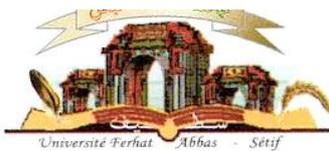


الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Université Ferhat Abbas Sétif 1
Faculté des Sciences de la
Nature et de la Vie



جامعة فرحات عباس، سطيف 1
كلية علوم الطبيعة و الحياة

DEPARTEMENT D'AGRONOMIE

N°...../SNV/2025

THÈSE

Présentée par

LAMARA Asma

Pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT 3^{ÈME} CYCLE

Filière : AGRONOMIE

Spécialité : AMELIORATION DES PLANTES

THÈME

Contribution à l'étude de la sélection de l'adaptation de quelques génotypes de blé tendre (*Triticum aestivum* L.) dans les conditions agro-climatiques semi-aride de la région de Sétif

Soutenue publiquement le 08 /05/ 2025

DEVANT LE JURY

Président	Mekhlouf Abdelhamid	Pr. Univ. Ferhat Abbas Sétif -1-
Directeur	Benniou Ramdane	Pr. Univ. Mohamed Boudiaf-M'Sila
Co-directeur	Fellahi Zine El Abidine	MCA Univ. M ^d El-Bachir El-Ibrahimi B.B.A
Examineur	Lazali Mohamed	Pr. Univ Djilali Bounaama Khemis Miliana
Examineur	Rouabhi Amar	Pr. Univ Ferhat Abbas Sétif -1-

Laboratoire Amélioration et Développement de la Production Végétale et Animale

ملخص

في المناطق شبه الجافة، حيث تواجه المحاصيل الحقلية تقلبات مناخية حادة واجهادات مائية متكررة، تُعد عملية انتقاء الأنماط الوراثية من القمح اللين التي تجمع بين الكفاءة الزراعية العالية، تحمل الإجهاد، والجودة الغذائية تحدياً رئيسياً لضمان زراعة مستدامة. هدفت هذه الدراسة إلى تقييم 34 نمطاً وراثياً، من بينها أربعة شواهد، من خلال مقارنة متعددة الأبعاد شملت تجارب حقلية تحت ظروف مطرية خلال الموسمين الزراعيين 21/2020 و 22/2021، واختبارات لتحمل الإجهاد المائي المحاكى باستخدام بولي إيثيلين غليكول PEG-6000، بالإضافة إلى توصيف تكنولوجي دقيق. أظهرت النتائج الزراعية وجود تباين وراثي معنوي بين الأنماط المدروسة لمعظم الصفات، مع تفاعل قوي بين النمط الوراثي والسنة. وقد تميزت بعض السلالات مثل L1، L20، L28، و L18 بمردود حبي مرتفع مرتبطة ارتباطاً وثيقاً بعدد السنابل ووزنها، وبدورة نباتية قصيرة إلى متوسطة. فيما يخص تحمل الإجهاد المائي، فقد أظهرت الأنماط L21، L28، L13، و L16 قدرة جيدة على التكيف، مع بروز النمط L28 بفضل جمعه بين المردودية الجيدة والتحمل للإجهاد الأسموزي. سمحت الدراسة التكنولوجية، المبنية على معايير فيزيائية-كيميائية (مثل محتوى البروتين، الغلوتين، الرطوبة والمواد المعدنية) ومعايير ريولوجية (المقاومة، القابلية للتمدد، طاقة التشوه)، بتصنيف الأنماط الوراثية إلى ثلاث مجموعات نوعية. وقد تميزت المجموعة الثالثة (G3)، التي تضم L18، L13، و L26، بجودة تكنولوجية متوسطة إلى عالية. بالجمع بين الصفات الزراعية والفيزيولوجية والتكنولوجية المواتية في بعض الأنماط الوراثية، وخاصة L28، L18، و L13، تتبوأ هذه السلالات مكانة بارزة كمرشحين مفضلين لبرامج الانتقاء المتكامل. وتعكس هذه النتائج أهمية اعتماد نهج شامل ومتوازن لتطوير أصناف قمح لين أكثر إنتاجية وملائمة لظروف المناطق شبه الجافة والتحديات المصاحبة لها.

كلمات مفتاحية: *Triticum aestivum*، تباين، مقاومة، مردود، إجهاد مائي، قيمة غذائية، انتخاب.

Résumé

Dans les zones semi-arides, où les cultures céréalières font face à une forte variabilité climatique et à des stress hydriques récurrents, l'identification de génotypes de blé tendre combinant performance agronomique, tolérance au stress et qualité technologique représente un enjeu majeur pour la durabilité agricole. Cette étude a porté sur l'évaluation de 34 génotypes, incluant quatre témoins, à travers une approche multidimensionnelle intégrant des essais agronomiques en conditions pluviales durant les campagnes 2020/21 et 2021/22, des tests de tolérance au stress hydrique simulé par le PEG-6000, ainsi qu'une caractérisation technologique approfondie. Les résultats agronomiques ont révélé une variabilité génétique significative pour la majorité des caractères étudiés, avec une forte interaction génotype \times année. Des lignées comme L18, L28, L1 et L20 se sont distinguées par un rendement élevé, fortement corrélé au nombre et au poids d'épis, et à un cycle végétatif court à intermédiaire. L'analyse de la tolérance au stress hydrique a mis en évidence la résilience des génotypes L21, L28, L13 et L16, avec L28 se démarquant par sa capacité à concilier bon rendement et tolérance au stress osmotique. L'étude technologique, fondée sur des paramètres physico-chimiques (protéines, gluten, humidité, matières minérales) et rhéologiques (résistance, extensibilité, énergie de déformation), a permis de classer les génotypes en trois groupes qualitatifs. Le groupe G3, incluant L13, L18 et L26, s'est illustré par une qualité technologique moyenne à élevée. La convergence de traits agronomiques, physiologiques et technologiques favorables chez certains génotypes, notamment L13, L18 et L28, les positionne comme des candidats de choix pour les programmes de sélection intégrée. Ces résultats illustrent l'intérêt d'une approche holistique pour le développement de variétés de blé tendre plus résilientes et productives, adaptées aux contraintes des zones semi-arides.

Mots clés : *Triticum aestivum*, variabilité, tolérance, rendement, stress hydrique, qualité technologique, sélection.

Abstract

In semi-arid regions, where cereal crops are challenged by severe climatic variability and recurrent water stress, identifying bread wheat genotypes that combine agronomic performance, stress tolerance, and technological quality is a major challenge for sustainable agriculture. This study evaluated 34 genotypes, including four controls, using a multidimensional approach encompassing agronomic trials under rainfed conditions during the 2020/21 and 2021/22 cropping seasons, stress tolerance tests induced by polyethylene glycol (PEG-6000), and in-depth technological characterization. Agronomic results revealed significant genetic variability among most traits, with strong genotype \times year interactions. Genotypes such as L18, L28, L1, and L20 exhibited high grain yield, strongly correlated with spike number, spike weight, and a short to intermediate vegetative cycle. Regarding drought tolerance, genotypes L21, L28, L13, and L16 showed strong resilience to osmotic stress, with L28 standing out by combining good yield performance and stress tolerance. The technological analysis, based on physicochemical parameters (protein, gluten, moisture, ash) and rheological properties (resistance, extensibility, deformation energy), allowed the classification of genotypes into three quality groups. Group G3, which included L13, L18, and L26, was characterized by medium to high technological quality. The convergence of favorable agronomic, physiological, and technological traits in certain genotypes, particularly L13, L18, and L28, makes them prime candidates for integrated breeding programs. These findings highlight the relevance of a holistic approach to developing more productive and resilient bread wheat varieties adapted to the challenges of semi-arid environments.

Key words: *Triticum aestivum*, variability, tolerance, yield, water stress, technological quality, selection.

Liste des abréviations

PFG : Pourcentage finale de germination.
TMG : Temps moyen de germination.
CVG : Coefficient de vélocité de germination.
IG : Indice de germination.
GMJ : Germination moyenne journalière.
NR : Nombre de racines.
LR : Longueur de racines.
LF : Longueur de la première feuille.
MFR : Matière fraîche racinaire.
MFA : Matière fraîche aérienne.
BFT : Biomasse fraîche totale.
ITS : Indice de tolérance au stress.
Y_p : biomasse fraîche totale en absence de stress.
Y_s : biomasse fraîche totale en présence de stress.
PEG : Polyéthylène glycol 6000.
ANOVA : Analyse de la variance.
P_{pds} : Plus petite différence significative.
ddl : degré de liberté.
SV : Source de variation.
CV : Coefficient de variation.
DPV : Durée de la phase végétative.
TRE : Teneur relative en eau.
PF : Poids frais.
PT : Poids turgide.
PS : Poids sec.
IC : Intégrité cellulaire.
TCV : Température du couvert végétal.
CHL : Chlorophylle.
SF : Surface foliaire.
HP : Hauteur de la plante.
NE : Nombre d'épis.
PE : Poids d'épis.
PMG : Poids de mille grains.
RDT : Rendement.
ITGC : Institut des grandes cultures.
INRA : Institut Nationale de la Recherche Agronomique d'Algérie.
 σ^2_g : Variance génotypique.
 σ^2_p : Variance phénotypique.
 σ^2_e : Variance environnementale.
CV_g : Coefficient de variation génotypique.
CV_g / CV_e : Indice de variation.
H²_{sl} : Héritabilité au sens large.
H : Humidité.
TC : Teneur en cendres.
Pro : Protéines.
GH : Gluten humide.
AE : Absorption d'eau.
P : Résistance de la pâte.
L : Extensibilité de la pâte.
W : Energie de déformation.
P/L : Rapport de configuration.
CP1 : Composante principale 1.
CP2 : Composante principale 2.

Liste des figures

Revue Bibliographique

Figure 1. Phélogénie schématique des différentes espèces de blés5

Chapitre 1

Figure 2. Moyennes mensuelles des pluviométries et températures enregistrées durant les campagnes d'étude.....34

Figure 3. Contribution des différentes sources de variation dans la variabilité observée au niveau des caractères mesurés.....41

Figure 4. Variation de la durée de la phase végétative chez les génotypes de blé tendre étudiés durant les campagnes agricoles 2020/21 (à gauche) et 2021/22 (à droite).....43

Figure 5. Variation de la teneur relative en eau chez les génotypes de blé tendre étudiés durant les campagnes agricoles 2020/21 (à gauche) et 2021/22 (à droite).....44

Figure 6. Variation de l'intégrité cellulaire chez les génotypes de blé tendre étudiés durant les campagnes agricoles 2020/21 (à gauche) et 2021/22 (à droite).....45

Figure 7. Variation de la température du couvert végétal chez les génotypes de blé tendre étudiés durant les campagnes agricoles 2020/21 (à gauche) et 2021/22 (à droite).....45

Figure 8. Variation de la teneur en chlorophylle chez les génotypes de blé tendre étudiés durant les campagnes agricoles 2020/21 (à gauche) et 2021/22 (à droite).....46

Figure 9. Variation de la surface foliaire de la feuille étendard chez les génotypes de blé tendre étudiés durant les campagnes agricoles 2020/21 (à gauche) et 2021/22 (à droite).....47

Figure 10. Variation de la hauteur de la végétation chez les génotypes de blé tendre étudiés durant les campagnes agricoles 2020/21 (à gauche) et 2021/22 (à droite).....48

Figure 11. Variation du nombre d'épis/m² chez les génotypes de blé tendre étudiés durant les campagnes agricoles 2020/21 (à gauche) et 2021/22 (à droite).....48

Figure 12. Variation du poids des épis chez les génotypes de blé tendre étudiés durant les campagnes agricoles 2020/21 (à gauche) et 2021/22 (à droite).....49

Figure 13. Variation du poids de mille grains chez les génotypes de blé tendre étudiés durant les campagnes agricoles 2020/21 (à gauche) et 2021/22 (à droite).....50

Figure 14. Variation du rendement en grains chez les génotypes de blé tendre étudiés durant les campagnes agricoles 2020/21 (à gauche) et 2021/22 (à droite).....51

Chapitre 2

Figure 15. Effet du stress hydrique induit par le PEG-6000 à différentes doses les variables mesurées chez les 34 génotypes de blé tendre étudiés. Les chiffres suivis par différentes lettres sont statistiquement différents au seuil de 5% de probabilité. La ligne pointillée correspond à la moyenne du traitement étudié.....71

Figure 16. Réduction en %, relativement au témoin T0, des valeurs prises par les variables mesurées chez les lignées de blé étudié.....72

Figure 17. Valeurs de la moyenne de la somme des rangs des génotypes de blé tendre, calculées sur la base des traits étudiées sous un potentiel osmotique de 15% PEG-6000.....73

Figure 18. Indice de tolérance au stress (STI) des génotypes de blé étudiés. Le cercle vert indique des valeurs STI égales à 1, alors que le cercle rouge correspond à la moyenne de STI.75

Figure 19. Répartition des génotypes suivant la classification de Fernandez.....77

Chapitre 3

Figure 20. Présentation des génotypes de blé sur le plan formé par les composantes principales F1 et F2.....96

Figure 21. Classification hiérarchique ascendante des 34 génotypes de blé sur la base des 9 paramètres physico-chimiques et alvéographiques mesurés.....97

Liste des photos

CHAPITRE 1

- Photo 1.** Vue général de l'essai installé au cours de la campagne agricole 2020/21 au site de l'INRAA de Sétif (Photo prise le 25/04/2021).....35
- Photo 2.** Echantillons de feuilles testées pour obtenir leur teneur en eau.....37
- Photo 3.** Echantillons de feuilles placées dans des tubes à essais remplis de 10 ml d'eau distillée (à gauche) et lecture de leurs conductivités (à droite).....37

Chapitre 2

- Photos 4.** Mise en place des essais.....64
- Photo 5.** Transplantation des grains germées et étude des paramètres de croissance.....66

Chapitre 3

- Photo 6.** Le moulin d'essai (A) utilisé pour obtenir de la farine (B) et éliminer le son extrait (C)....86
- Photo 7.** L'INFRAMATIC de type PERTEN utilisé pour évaluer la qualité des farines de blé.....87
- Photo 8.** L'alvéographe de Chopin utilisé pour déterminer les paramètres rhéologiques des farines de blé.....88

Liste des tableaux

Revue bibliographique

Tableau 1. Les parties constitutives du grain de blé et leur composition7

Chapitre 1

Tableau 2. Matériel végétal constitué des lignées et des témoins de blé tendre35

Tableau 3. Carrés moyens de l'analyse de la variance des caractères phéno-morpho-physiologiques.....39

Tableau 4. Carrés moyens de l'analyse de la variance combinée du rendement et ses composantes.....40

Tableau 5. Valeurs moyennes des caractères mesurés en 2020/21 et 2021/22 chez les 34 génotypes de blé tendre évalués.....42

Tableau 6. Paramètres génétiques et non-génétiques estimés pour les caractères étudiés durant les deux campagnes d'expérience.....52

Tableau 7. Paramètres génétiques et non-génétiques estimés pour les caractères étudiés par environnement.....54

Tableau 8. Coefficients de corrélations phénotypiques entre caractères durant les campagnes agricoles 2020/21 et 2021/2256

Chapitre 2

Tableau 9. Indice de germination calculée pour les 34 génotypes de blé tendre étudié64

Tableau 10. Carrés moyens de l'analyse de variance des variables étudiées.....68

Tableau 11. Valeurs moyennes, minimales et maximales des variables mesurées chez les lignées étudiées.69

Tableau 12. Biomasse fraîche totale des génotypes de blé dans les conditions normales et dans les conditions stressées et leurs indices de tolérance au stress.....74

Tableau 13. Coefficients de corrélation entre l'indice de tolérance au stress et les biomasses fraîches totales produites en absence (Y_p) et en présence (Y_s) de stress pour les 34 génotypes de blé étudiés.....76

Chapitre 3

Tableau 14. Carrés moyens de l'analyse de la variance des variables étudiées.....88

Tableau 15. Valeurs moyennes des variables étudiées chez les génotypes de blé.....89

Tableau 16. Coefficients de corrélations entre les variables étudiées.....94

Tableau 17. Coefficients de corrélations entre les variables et les facteurs.....95

Tableau 18. Paramètres génétiques et non génétiques des variables étudiées.....97

Sommaire

Liste des abréviations	
Liste des figures	
Liste des photos	
Liste des tableaux	
Introduction générale	1

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I : Généralités sur le blé tendre

1. Origine géographique du blé tendre	4
2. Génome du blé tendre	4
3. Production et importance économique du blé tendre.....	5
3.1. Dans le monde.....	5
3.2. En Algérie.....	6
4. Utilisation du blé.....	6
5. Aire de culture du blé tendre en Algérie.....	6
6. Structure du grain de blé.....	7
6.1. Enveloppes.....	8
6.2. Amande.....	8
6.3. Germe.....	8
7. Composition biochimique du grain de blé tendre.....	8
7.1. Glucides.....	8
7.2. Protéines.....	9
7.3. Lipides.....	10
7.4. Vitamines.....	10
7.5. Matières minérales.....	10
8. Collecte de grains de blé	11
9. Missions de service qualité au niveau de la CCLS	11
10. Classification commerciale du grain du blé.....	11
11. Transformation de blé tendre en farine	12
11.1. Mouture avec le moulin à pierre	12
11.2. Mouture avec moulin moderne (à cylindres).....	12
11.3. Conditionnement du grain de blé.....	12
11.3.1. Pré-nettoyage de grains de blé.....	12
11.3.2. Nettoyage de grains de blé	13
11.3.3. Conditionnement de grains de blé	13
11.3.4. Broyage du grain.....	13

CHAPITRE II : Appréciation de la qualité des farines

1. Analyses physico-chimiques	14
1.1. Taux d'humidité du grain	14
1.2. Taux de cendres du grain	14
1.3. Teneur en protéines du grain.....	14
1.4. Teneur en gluten humide du grain	15
1.5. Absorption en eau	15
2. Analyses rhéologiques.....	15
3. Outils d'évaluation de la qualité	16

CHAPITRE III : comportement de la culture de blé tendre dans les conditions agro-climatiques semi-aride

1. Contraintes de la production céréalière	17
1.1. Contraintes abiotiques.....	17
1.1.1. Stress thermique	17

1.1.1.2. Basses températures	17
1.1.1.3. Hautes températures.....	18
1.1.2. Stress hydrique.....	18
2. Mécanismes d'adaptation.....	19
3. Adaptations physiologiques	19
3.1. Durée de la phase végétative.....	19
3.2. Teneur relative en eau.....	20
3.3. Intégrité cellulaire	20
3.4. Température du couvert végétal	21
3.5. Teneur en chlorophylle	21
3.6. Surface foliaire.....	22
4. Caractères agronomiques.....	22
4.1. Rendement et ses composantes	22

CHAPITRE IV : **Effet du stress hydrique sur la culture de blé tendre**

1. Etude comparative entre les essais expérimentaux au champ et au laboratoire.....	24
1.1. Le stress artificiel	24
1.2. Effet du polyéthylène glycol au stade juvénile	25
1.2.1. Germination.....	25
1.2.2. Nombre de racines	25
1.2.3. Longueur des racines	26
1.2.4. Longueur de la première feuille.....	26
1.2.5. Biomasse fraîche totale.....	27

CHAPITRE 01 : ***Evaluation de la variabilité génotypique des lignées avancées de blé tendre évaluées sous conditions semi-arides***

Résumé	30
Introduction	31
Matériel et Méthodes.....	33
1. Sites expérimentaux.....	33
2. Matériel Végétal	34
3. Dispositif expérimental.....	34
4. Mesures et notations	36
4.1. Caractères phéno-morphologiques.....	36
4.1.1. Durée de la phase végétative.....	36
4.1.2. Surface foliaire de la feuille étendard.....	36
4.2. Caractères physiologiques	36
4.2.1. Teneur relative en eau	36
4.2.2. Intégrité cellulaire	37
4.2.3. Température du couvert végétal	38
4.2.4. Teneur en chlorophylle des feuilles	38
4.3. Caractères agronomiques.....	38
4.3.1. Hauteur de la végétation	38
4.3.2. Rendement en grain, poids des épis et nombre d'épis.....	38
4.3.3. Poids de mille grains.....	38
5. Analyse des données.....	38
Résultats et Discussion.....	39
1. Etude de la variabilité des caractères mesurés	39
1.1. Caractères phéno-morpho-physiologiques.....	39
1.2. Rendement et ses composantes.....	40
2. Etude des valeurs moyennes des caractères mesurés	41
2.1. Effet moyen 'année'	41
2.2. Effet moyen 'génotype'	42
2.2.1. Durée de la phase végétative.....	43
2.2.2. Teneur relative en eau	43

2.2.3. Intégrité cellulaire.....	44
2.2.4. Température du couvert végétal.....	45
2.2.5. Teneur en chlorophylle.....	46
2.2.6. Surface foliaire.....	46
2.2.7. Hauteur de la végétation.....	47
2.2.8. Nombre d'épis/m.....	48
2.2.9. Poids d'épis.....	49
2.2.10. Poids de mille grains.....	49
2.2.11. Rendement en grains.....	50
3. Composantes de la variation.....	51
4. Corrélations phénotypiques entre les caractères mesurés.....	54
Conclusion.....	58

CHAPITRE 02 : Caractérisation précoce de la tolérance du blé tendre au stress hydrique induit par le polyéthylène glycol (PEG-6000)

Résumé.....	60
Introduction.....	61
Matériels et méthodes.....	63
1. Matériel végétal et conditions expérimentales.....	63
1.1. Essai de germination.....	63
1.2. Essai de comportement des jeunes plantules.....	65
2. Mesures et notations.....	66
3. Analyse des données.....	66
Résultats et discussion.....	67
1. Effet moyen 'Génotype'.....	68
1.1. Essai de germination.....	68
1.2. Essais de croissance.....	69
2. Effet moyen 'Stress'.....	69
3. Effet moyen des interactions 'Génotype * Stress'.....	71
Conclusion.....	81

CHAPITRE 03 : Evaluation de quelques caractères physico-chimiques et rhéologiques des farines de blé tendre

Résumé.....	83
Introduction.....	84
Matériel et méthodes.....	86
1. Préparation des échantillons de la farine.....	86
2. Evaluation des propriétés physico-chimiques des farines.....	87
3. Evaluation des propriétés rhéologiques des farines.....	87
4. Analyse des données.....	88
Résultats et discussion.....	88
1. Paramètres physico-chimiques des farines.....	88
1.1. Humidité de la farine.....	89
1.2. Teneur en cendres.....	90
1.3. Teneur en protéines de la farine.....	90
1.4. Teneur en gluten humide.....	91
1.5. Absorption en eau.....	91
2. Paramètres alvéographiques des farines.....	92
2.1 Résistance de la pâte « P » à la déformation.....	92
2.2. Extensibilité de la pâte « L ».....	92
2.3. Energie de déformation « W » ou résistance au four.....	92

2.4. Rapport de configuration « P/L ».....	93
3. Structuration et corrélation des variables, et classification des géotypes.....	93
Conclusion.....	99
Conclusion générale.....	100
Références bibliographiques.....	103

INTRODUCTION

Introduction

La nutrition, à l'échelle mondiale, repose principalement sur les céréales. Selon les statistiques de la FAO (2024), portant sur la période 2021-2023, les céréales occupent la première place parmi les produits les plus consommés, devant les légumes, les fruits, les viandes ou les produits laitiers. À la fin de l'année 2024, les stocks mondiaux de céréales devraient atteindre 890 millions de tonnes, soit une augmentation de 2.1 % par rapport à 2023. D'importantes quantités de céréales sont importées par les pays d'Afrique et d'Asie pour répondre à une demande croissante due à l'augmentation rapide de la population, représentant respectivement 53 % et 50 % de l'ensemble de leurs importations alimentaires.

En Algérie, le blé constitue l'aliment de base pour toutes les catégories sociales. Le blé tendre, en particulier, permet la production d'une large gamme de produits tels que le pain, les biscuits et les pâtisseries (Lopes *et al.*, 2012 ; Shewry *et al.*, 2015). La demande croissante pour ces produits exige une augmentation significative de la production nationale dans l'ensemble des zones céréalières, afin d'éviter les risques de pénuries prolongées.

La culture du blé tendre est largement répandue dans les zones agro-écologiques semi-arides et les hauts plateaux algériens. Toutefois, la production dans ces régions reste faible, principalement en raison des aléas climatiques marqués par une forte variabilité intra- et interannuelle des précipitations et des températures (Chennafi *et al.*, 2006 ; Ladoui *et al.*, 2020).

Les changements climatiques affectant le bassin méditerranéen se traduisent par une élévation notable des températures et une raréfaction des ressources en eau, ce qui impacte négativement les rendements agricoles (Lesk *et al.*, 2016 ; Ding *et al.*, 2021). Les géotypes cultivés dans ces conditions stressantes, où la sécheresse constitue un facteur limitant majeur, peuvent produire des grains de qualité médiocre : chétifs, échaudés et mal remplis. Cela se reflète dans les farines extraites, qui présentent des caractéristiques technologiques et nutritionnelles dégradées. Ces altérations affectent non seulement la taille et la forme des grains, mais aussi leur composition interne, perturbant les propriétés physico-chimiques de l'amidon, des protéines et d'autres composés (Talukderet *et al.*, 2014 ; Duseng *et al.*, 2019). Les perturbations touchant les aspects externes et internes du grain influencent donc sa qualité technologique, avec des conséquences industrielles significatives, notamment une faible quantité de farine extraite lors de la transformation.

Dans les zones céréalières à disponibilité hydrique limitée, il est impératif d'identifier et de sélectionner des géotypes résistants et productifs, critères fondamentaux pour atteindre des rendements optimaux (Madic *et al.*, 2012 ; Khatodia *et al.*, 2019). La sélection pour le rendement en grains peut emprunter deux voies : une sélection uniquement basée sur le rendement final, appelée

sélection directe. Ce type de sélection est parfois non reproductible en raison de l'instabilité du rendement d'une campagne à l'autre ; l'autre type de sélection vise à identifier un certain nombre de caractères susceptibles d'être liés au rendement (Chowdhury *et al.*, 2021). Dans cette approche, plusieurs études en agronomie ont mis en évidence des paires de caractères pouvant être fortement ou faiblement associées au rendement. Ces caractères peuvent être d'ordre phénologiques, morpho-physiologiques ou biochimiques (Langridge et Reynolds, 2021).

L'amélioration génétique du blé dans les milieux arides repose ainsi sur l'identification de parents porteurs de caractères adaptatifs. L'hybridation entre ces parents permet de transmettre et fixer les caractères d'intérêt dans les générations futures (Mohammadi, 2018 ; Gerard *et al.*, 2020). Cependant, dans de larges populations, la sélection mono- ou multi-caractères ne peut être efficace que si elle s'appuie également sur des paramètres non génétiques permettant de dissocier les composantes environnementales et génétiques de la variabilité phénotypique. Cela oriente les sélectionneurs vers un criblage rigoureux et ciblé du matériel végétal (Ngwepe *et al.*, 2021).

Le domaine agricole a connu des avancées notables ces dernières années, grâce aux efforts des chercheurs et à la valeur ajoutée générée par les nouvelles technologies et innovations. Il est attendu que l'offre alimentaire, tant au niveau mondial qu'en Algérie, continue à croître au fil des prochaines décennies. Dans ce contexte, le présent travail a pour objectif global d'identifier et de valoriser les géotypes de blé tendre les plus prometteurs pour les zones semi-arides d'altitude, en combinant rendement, tolérance à la sécheresse et qualité technologique. Pour atteindre cet objectif, l'étude s'articule autour des objectifs spécifiques suivants :

1. Analyser la variabilité génétique des 34 lignées de blé tendre étudiées, à travers l'estimation de paramètres génétiques liés aux caractères agronomiques et à la tolérance à la sécheresse, afin d'évaluer leur potentiel d'amélioration.
2. Évaluer la réponse au stress hydrique simulé par le polyéthylène glycol (PEG-6000), en étudiant ses effets sur la germination et la croissance des plantules, en vue de détecter les lignées les plus résilientes aux conditions de déficit hydrique.
3. Caractériser la qualité technologique des farines issues de ces géotypes, à l'aide de tests physico-chimiques et rhéologiques, afin d'identifier les lignées alliant productivité et aptitude à la transformation industrielle.

PARTIE I :
REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

Partie 1 : Revue Bibliographique

Chapitre I : Généralités sur le blé tendre

1. Origine géographique du blé tendre

Le blé est une céréale à paille à inflorescence en épi qui appartient au genre *Triticum*, tribu des *Triticées*, de la famille des *Poaceae* et plus largement au groupe des angiospermes monocotylédones (Bolot *et al.*, 2009). C'est une céréale dont le grain est un fruit sec et indéhiscence, appelé caryopse, constitué d'une graine et de téguments (Feuillet, 2000).

Les plantes sont les êtres vivants les plus abondants sur Terre. Elles sont omniprésentes à l'échelle de la planète. Elles constituent une part importante de la chaîne alimentaire car elles sont consommées tant par les vertébrés que par les invertébrés. Le blé en est un représentant majeur. Il a une importance stratégique pour l'être humain.

Remontant dans le passé, l'histoire du blé a commencé par la récolte des graminées sauvages. Ensuite est arrivée la période néolithique où l'être humain a commencé à pratiquer la domestication et la sélection des graines dans le croissant fertile, au Moyen-Orient, sur le territoire de l'actuel Iraq jusqu'en Turquie, en Syrie et en Palestine (Ruel, 2006).

La nourriture des populations anciennes provenait majoritairement des activités de chasse et de cueillette. L'homme se déplaçait d'une zone à une autre pour subvenir à ses besoins alimentaires. Mais progressivement, il a changé son mode de vie en abandonnant le nomadisme. Il est devenu sédentaire, se mettant alors à cultiver, récolter, sélectionner et stocker les grains pour les campagnes à venir.

La diffusion du blé tendre en Algérie a été initiée par Léon Ducellier (1878-1937). Il était chargé de recenser tout le matériel végétal existant à époque. Cela a nécessité des sorties sur le terrain pour découvrir et analyser toutes les variétés cultivées. Il a sélectionné les meilleurs échantillons : les plus robustes, les plus productifs et les plus résistants à la sécheresse ou à certaines maladies.

2. Génome du blé tendre

Que ce soit dur ou tendre, le blé a évolué au fil du temps à travers une succession d'évènements d'hybridation entre les différents génomes, permettant d'obtenir les espèces actuellement cultivées.

Le blé tendre est constitué de trois génomes de graminées sauvages. Dans le premier évènement d'hybridation, l'addition des espèces *Triticum monococcum* et *Triticum speltoides* a conduit à l'apparition du blé tétraploïde (*Triticum turgidum*). Le second évènement d'hybridation a eu lieu au cours de la domestication, entre le blé dur cultivé et une autre espèce diploïde appelée *Aegilops*

taushi, donnant ainsi naissance au *Triticuma estivum* avec 6 exemplaires de chaque chromosome (Paux *et al.*, 2008 ; Pourkheirandish *et al.*, 2018).

Les trois génotypes constitutifs du blé tendre lui confèrent une grande capacité d'adaptation. Il peut ainsi s'adapter à des terroirs et à des climats très différents.

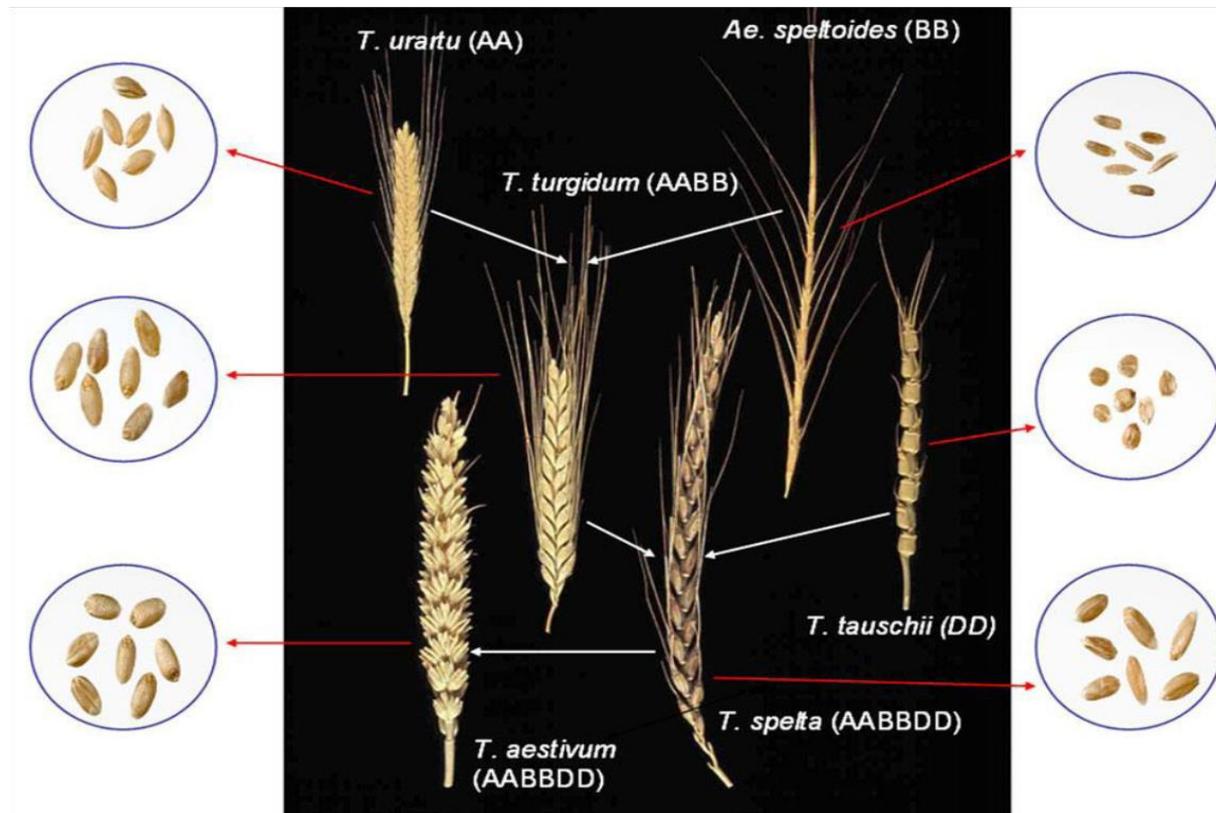


Figure 1. Phylogénie schématique des différentes espèces de blés (Shewry, 2009).

3. Production et importance économique du blé tendre

3.1. Dans le monde

Le blé tendre fait partie des céréales les plus consommées dans le monde. Il revêt une grande importance socioéconomique et même politique, comme c'est le cas aujourd'hui dans le conflit russo-ukrainien. Selon des statistiques récentes, il occupe 95 % de la superficie totale des terres dédiées à la culture du blé dans le monde (Xiaojie *et al.* 2012 ; Poutanen *et al.*, 2022).

Selon le Conseil international des céréales (CIC, 2021), en octobre 2021, les prévisions de production mondiale de blé tendre étaient de 781 millions de tonnes. Soit une augmentation de 14 millions de tonnes par rapport à la campagne 2020. Cette élévation du volume de production s'explique par la forte demande cette culture. Dans ce contexte, selon les prévisions des experts du (CIC, 2021), la consommation mondiale devrait être élevée, atteignant environ 783 millions de tonnes.

On note que dans les pays méditerranéens, le blé représente la principale production agricole, occupant 50 % des surfaces cultivées (Bencharif *et al.*2009).

3.2. En Algérie

En Algérie, la consommation de céréales et de leurs dérivés constitue la principale ressource alimentaire. Elle est estimée à 185 kg par habitant et par an apportant plus de 60 % des calories et 70 à 80 % des protéines de l'ensemble des aliments consommés (Feliachi, 2000).

En 2021, la production algérienne de blé tendre a atteint 3.342.243 quintaux (MADRP-DSASI, 2022), avec un rendement de 13.9 quintaux par hectare. Ces chiffres représentent la faiblesse de la production pour cette denrée alimentaire.

L'Algérie est un pays importateur de blé tendre, classé parmi les premiers. Les rendements insuffisants de l'agriculture, associés à une démographie galopante, et donc à une consommation croissante, en sont les principales causes. Aujourd'hui, la filière céréaliculture s'est attelée à la tâche de développer des variétés productives adaptées au climat nord-africain.

4. Utilisation du blé

Le blé tendre est une espèce aux multiples usages ; sa transformation permet d'obtenir une farine panifiable utilisée en boulangerie et en pâtisserie. Les sous-produits de la culture du blé tendre, tels que la paille, le son et le remoulage, sont utilisés dans l'alimentation du bétail. Le blé tendre trouve des applications dans le domaine industriel.

Dans l'industrie agroalimentaire, il sert à la production de gluten ou d'amidon, et à l'extraction de sirop de glucose qui entre dans la fabrication de pâtisseries et de boissons édulcorées. Il est également utilisé dans l'industrie cosmétique, l'industrie papèterie et, plus récemment, dans la production de biocarburants (bioéthanol) et la fabrication de matériaux plastiques biodégradables (Poitrat, 1990 ; Debiton, 2010).

5. Aire de culture du blé tendre en Algérie

En tenant compte des zones agro-écologiques, trois zones céréalières distinctes peuvent être identifiées en Algérie, en fonction des conditions climatiques, notamment la pluviométrie et de la productivité des sols.

- **Une zone à hautes potentialités** : Cette zone, qui comprend les plaines de l'Algérois et de la Mitidja, bassin des Issers, vallée de la Soummam, Draa El-Mizan, Miliana, Boumedfaa et de l'Oued El Kebir dans le Constantinois à l'Est (Didouche Mourad, Mila, El-Milia, Guerarem, Guelma et Bouchegouf), ainsi que les Hautes vallées de l'Atlas tellien dans les wilayas de Mostaganem et de Tlemcen, se caractérise par une pluviométrie moyenne supérieure à 600 mm/ an et des

rendements moyens d'environ 20 quintaux par hectare. Cette zone est considérée comme potentiellement favorable aux cultures céréalières, fourragères et industrielles (Abbas *et al.*, 2001 ; Benniou, 2008).

- **Une zone à moyennes potentialités** : Cette zone, qui comprend les monts de Tessala (Sidi-Bel-Abbès), les monts de Tlemcen, Mascara, Ouarsenis, Sersou (Tiaret), le mont de Saïda la vallée du Chélif, le massif de Médéa, et le mont d'Ain Mlila, Hamma-Bouziane, se caractérise par une pluviométrie comprise entre 450 et 600 mm/an. Cependant, elle est sujette à des crises climatiques intenses, ayant un impact significatif sur les rendements, qui peuvent varier entre 5 et 15 quintaux/hectare. Cette zone couvre une superficie agricole utile (SAU) d'environ 1.600.000 hectares, dont la moitié est réservée à la céréaliculture. Elle est considérée comme moyennement potentielle pour les cultures céréalières, fourragères et industrielles (Abbas *et al.*, 2001, Benniou, 2008).

- **Une zone à basses potentialités** : Cette zone comprend les hauts-plateaux de l'Est et de l'Ouest algérien, ainsi que le Sud du massif des Aurès. Elle se caractérise par un climat semi-aride, avec une pluviométrie moyenne inférieure à 350 mm/ an. Sa superficie agricole utile (SAU) avoisine les 4.500.000 hectares, dont la moitié est utilisée pour la culture des céréales, principalement le blé tendre dans les plaines intérieures et les hauts-plateaux (Fellahi, 2017).

6. Structure du grain de blé

De forme ovoïde, présentant sur sa face ventrale un sillon qui s'étend sur toute sa longueur, le grain de blé est nu, obtenu après battage ; c'est-à-dire après avoir été débarrassé des balles qui l'enveloppent. Le germe, surmonté d'une brosse, occupe la base dorsale du grain de blé, qui mesure entre 5 et 7 mm de long et entre 2,5 et 3,5 mm d'épaisseur. Son poids moyen oscille entre 20 et 50 mg (Surget et Barron, 2005). Sa couleur varie du roux au blanc (Calvel, 1983). La teinte dépend de plusieurs paramètres tels que le pays d'origine, le type de sol, le mode de culture et le climat. Le grain de blé tendre est constitué de 3 grandes parties (Emillie, 2007). Ses proportions se déclinent comme suit (Belderok *et al.*, 2000) :

Tableau 1 : les parties constitutives du grain de blé et leurs compositions

Parties du grain	Enveloppes	Endosperme	Germe
Pourcentages par rapport au poids total	13 à 17 %	80 à 85 %	2 à 3 %

6.1. Les enveloppes

Solidaires de l'albumen et connues sous le nom de "son de blé", les enveloppes sont constituées d'une superposition de couches cellulaires formant plusieurs tissus différenciés : le péricarpe, le testa et la bande hyaline. Le péricarpe, ou enveloppe du fruit, regroupe les tissus externes du grain et représente environ 5 % du poids total (Hoseney, 1986 ; Pomeranz, 1988). On distingue deux parties : le péricarpe externe et le péricarpe interne.

Le testa, à l'origine de la couleur du blé (jaune ou roux), constitue l'enveloppe de la graine. Il est très fin (5 à 8 µm), tout comme la bande hyaline ou épiderme du nucelle, qui est également très fine. Ils contiennent notamment des composés lipidiques, dont de la cutine (Matzke et Riederer, 1990).

Les enveloppes sont riches en vitamine B, en minéraux et surtout en fibres, jouant un rôle nutritionnel très important pour l'être humain. Leur composition biochimique, comprend principalement des polysaccharides comme la cellulose, le xylose, l'arabinose mais aussi des acides phénoliques, de la lignine et des protéines (essentiellement des albumines et des globulines localisées dans la couche à aleurone) (McKevith, 2004). De par leur richesse en métabolites et leur structure rigide, les enveloppes remplissent un double rôle nourricier et de protection.

6.2. L'amande

L'amande constitue une réserve d'énergie de la graine. La plantule y trouve la nourriture nécessaire à la germination et au développement (Surget et Barron, 2005). C'est le plus grand compartiment du grain, contenant le tissu de réserve constitué d'albumen amylicé. Ce dernier est composé principalement de granules d'amidon enchâssés dans une matrice protéique (albumines, globulines, gliadines et gluténines), dont la concentration augmente du bord vers le centre.

6.3. Le germe

Le germe est la partie vitale du grain où se trouve l'embryon, à l'origine de la future plante. Il assure l'identité génétique de la variété (Boudreau et Ménard, 1992). Le germe est formé de l'axe embryonnaire, qui génère la tigelle, la mésocotyle et la radicule, ainsi que du scutellum qui donne le cotylédon (Evers et Millar, 2002). Il est riche en matières grasses et en vitamine E. Les albumines et les globulines y sont les protéines les plus abondantes, représentant environ 35 % de la matière sèche (Godon, 1982 ; Cornell, 2003).

7. Composition biochimique du grain de blé tendre

7.1. Glucides

La graine de blé a une forte teneur en glucides. C'est une graine amylicée. Le glucide le plus abondant est l'amidon. Ce polysaccharide se concentre au sein de l'albumen sous forme de granules

constitués de deux types de polymères de glucose : l'amylose et l'amylopectine, dont les proportions sont respectivement estimées entre 20 et 30 % pour la première et entre 70 à 80 % pour la seconde (Konik-Rose *et al.* 2007). L'amylose est formée de longues chaînes linéaires flexibles, tandis que l'amylopectine est une molécule plus grande, ramifiée et de poids moléculaire plus élevé. La synthèse de ces deux molécules est génétiquement contrôlée par l'activité des enzymes SSS (Soluble Starch Synthase Enzyme) et GBSS (Granule-Bound Starch Synthase) (Jiang *et al.* 2003 ; Zhang *et al.* 2010). Il faut également noter que les conditions environnementales comme la température, l'intensité lumineuse après l'anthesis, et la quantité d'eau disponible, influencent la proportion des différents types de granules (Lasme, 2011).

Plusieurs études ont montré que les granules d'amidon de blé, dont les diamètres sont très variables et compris entre 1 et 50 μm , sont perméables, grâce à des canaux, à certaines molécules, notamment des protéines et des lipides qui peuvent passer dans leur matrice (Han *et al.* 2005 ; Kim et Huber, 2008). Ce phénomène a également été observé sur les granules d'amidon d'autres céréales comme le maïs et le sorgho, qui contiennent des canaux similaires (Lee et BeMiller, 2008).

L'amidon est un réservoir important de sucres fermentescibles qui assurent la multiplication et la croissance des levures. Il intervient ainsi de différentes manières dans le processus de fabrication du pain. C'est aussi un agent de rétention d'eau ; il absorbe environ 45 % de l'eau rajoutée à la farine. Il constitue enfin une charge de remplissage qui assure la dilution du gluten. Ses interactions avec les protéines du gluten peuvent modifier les propriétés de la pâte.

7.2. Protéines

Des études récentes ont montré que la teneur en protéines du blé varie de 10 % à 18 % (Sramkova *et al.* 2009). Ces protéines ne sont pas réparties de manière uniforme dans le grain de blé. Elles sont localisées principalement dans le germe et l'assise protéique (Abdellaoui, 2007). Comme toutes les protéines des céréales, elles sont souvent pauvres en trois acides aminés essentiels : le tryptophane, la lysine et la thréonine (Bicar *et al.* 2008).

La classification des protéines du blé a été initiée pour la première fois par Osborne en 1907. Ce dernier a poursuivi ses travaux jusqu'en 1924 où il définit quatre groupes de protéines caractérisées par leur solubilité dans différents milieux (Osborne, 1924). Ce sont :

- Les Albumines solubles dans l'eau ;
- Les Globulines solubles dans les tampons salins ;
- Les Gliadines solubles dans une solution d'alcool à 70 % ;
- Les Gluténines solubles dans une base, un acide ou des détergents en présence d'un réducteur.

Cette classification a fait l'objet d'une révision en 1986 par Shewry et ses collaborateurs, qui ont proposé deux grandes catégories de protéines :

- Les protéines métaboliques (protéines de structure) : Albumines et Globulines.
- Les protéines de réserve (protéines du gluten) : Gliadines et Gluténines.

7.3. Lipides

Ce sont des constituants mineurs du blé. Ils ne représentent en poids que 1,5 à 2,5 % (Daniels *et al.*, 1971). Mais cette faible quantité est d'un intérêt particulier car elle modifie le comportement des autres constituants. Il est à noter par ailleurs que le grain de blé est riche en acides gras saturés, localisés dans le germe (15 %) et dans les enveloppes (12 %), (Calvel, 1980).

Les lipides du blé forment une classe complexe et hétérogène en raison de leur insolubilité dans l'eau mais de leur solubilité dans des solvants organiques (chloroforme, éther, benzène,...). Ils sont constitués de longues chaînes hydrocarbonées et contiennent un ou plusieurs acides gras ou des dérivés d'acides gras. On les classe en deux groupes : les lipides neutres et les lipides polaires. Leurs proportions varient en fonction de divers facteurs (notamment la variété et le milieu). Les lipides polaires représentent approximativement 30 % des lipides du blé. Ils comprennent environ 12 % de glycolipides et 18 % de phospholipides (Konopka *et al.*, 2005).

7.4. Vitamines

Les vitamines sont des substances organiques essentiellement localisées dans le germe et les enveloppes des céréales. Elles sont très actives même à petites doses. Leur répartition varie selon le sol, le climat et la variété du blé, mais aussi en fonction des traitements technologiques, qui ont un impact beaucoup plus important car certaines vitamines sont très sensibles à la chaleur (Roudaut et Lefrancq, 2005). Les principales vitamines présentes sont les vitamines B1, B2, B3, B5, B6, B9 et E.

7.5. Matières minérales

Ces substances se trouvent en très faibles quantités dans les aliments d'origine animale ou végétale. Elles sont indispensables à la nutrition mais en petites doses. Absorbées à fortes doses, elles deviennent toxiques. Elles se concentrent principalement dans les enveloppes du grain de blé (Bushuk, 1986).

Les éléments minéraux présents dans le grain de blé sont en proportions très variables. Ainsi, on trouve 75 % de potassium (300 – 600 mg/ 100 g de matière sèche), du phosphore (200 – 500 mg), dont la majeure partie est sous forme de phytate, du soufre (100 – 250 mg), du magnésium (100 – 150 mg), du chlore (50 – 150 mg) et du calcium (25 – 100 mg). Ces éléments minéraux existent à

l'état combiné mais jamais à l'état libre. La teneur en minéraux du blé dépend du sol, du climat, de la fumure et même de l'année (Godon, 1995).

8. Collecte de grains de blé

À la fin de chaque campagne agricole, les céréales sont récoltées et collectées au niveau de la CCLS (Coopérative de Céréales et Légumes Secs). Les blés reçus sont stockés dans des magasins à plat fond ou des silos en béton ou métalliques, pour une durée à moyen, ou long terme. Le stockage prend en compte le mouvement régulier des stocks dans les silos.

Les grains collectés par les agriculteurs sont stockés pour être ensuite envoyés vers les moulins, tandis que les grains issus du programme de multiplication, provenant des agriculteurs multiplicateurs sont réceptionnés, stockés, traités et classés par variété et par catégorie dans le but d'être réutilisés comme semences. Au niveau de la CCLS, le service "Semences et Appui à la Production", a la charge de suivre le processus de la production de semences, avant leur mise en place chez l'agriculteur-multiplicateur jusqu'à la récolte, nécessitant plusieurs visites de la parcelle de multiplication.

9. Missions de service qualité au niveau de la CCLS

Lors de l'arrivage à la CCLS, chaque lot de grain de blé fait l'objet d'une analyse commerciale. On commence par déterminer le poids spécifique du grain réceptionné, puis on mesure son humidité. Une deuxième analyse est ensuite réalisée pour évaluer la qualité de la semence, en séparant les impuretés de première catégorie (grains nuisibles, ergot) et les impuretés de deuxième catégorie (grains cassés, germés, chétifs et punaisés). La qualité du blé est principalement déterminée par les taux de ces différentes impuretés : plus ce taux est élevé plus la qualité du lot diminue, ce qui a un impact sur le rendement en farine (pour le blé tendre) et en semoule (pour le blé dur).

10. Classification commerciale du grain du blé

Les spécialistes de la qualité du grain de blé ont classé le blé tendre en deux types : Soft et Hard en se basant sur la dureté du grain ainsi que la texture de l'amande. Les blés facilement friables lors du broyage renferment des quantités faibles en protéines. Ils sont généralement utilisés pour la fabrication des pâtisseries, biscuits et cookies (Kweon *et al.*, 2014). En revanche, le groupe du blé dur (hard), contient un pourcentage élevé de protéine. Le processus d'écrasement et de broyage des grains dur dure plus longtemps. Ces blés sont destinés à la fabrication du pain (Posner, 2003).

La dureté du grain est contrôlée génétiquement par un locus de caractère quantitatif nommé locus de dureté (Mattermet *et al.*, 1973 ; Law *et al.*, 1978). Ce locus se trouve sur le bras court du chromosome 5D. En plus de ce gène, Turner *et al.*, (2004) ont montré que les chromosomes 2B, 6B

et 7A contiennent également des locus de dureté. Les études sont toujours en cours. Weightman *et al.*, (2005) ont identifié 4 locus pour la dureté présentée par 2A, 2D, 3A et 6D.

11. Transformation de blé tendre en farine

11.1. Mouture avec le moulin à pierre

Cette méthode consiste à mettre les grains de blé sec entre deux meules rondes superposées puis à faire tourner la meule supérieure alors que la seconde reste fixe (Walker et Eustace, 2016). Le frottement entre les deux meules provoque la mouture de l'intégralité du grain, cette méthode nécessitant une force mécanique pour garantir la transformation de tous les compartiments du grain (Fico *et al.*, 2016). Le produit récupéré est riche en éléments minéraux, matières grasses, protéines, vitamines et glucides (Cappelli *et al.*, 2018 ; Di Silvestro *et al.*, 2014).

11.2. Mouture avec moulin moderne (à cylindres)

Les nouvelles techniques apportées dans l'industrie agroalimentaire des céréales et du blé en particulier, exigent l'utilisation d'équipement très développées afin de produire de grandes quantités avec beaucoup de maîtrise face à une demande toujours croissante. Les grains de blé locaux ou importés sont transportés dans des camions vers les moulins. La transformation des grains de blé dur se fait dans les semouleries, tandis que celle des grains de blé tendre se déroule au niveau des minoteries. Les techniciens chargés de la qualité au niveau des moulins ont pour rôle d'analyser la matière première à partir des paramètres suivants : le poids spécifique, le poids de mille grains, l'humidité, le taux d'impuretés et la présence d'insectes notamment les charançons. La matière finale est évaluée à travers les caractères suivants : l'humidité, le taux de cendres, les protéines, le gluten humide et les propriétés rhéologiques.

Avant d'entamer l'analyse, le laborantin doit procéder, à travers quelques opérations standards, à dégrossir le lot de grains dans le but d'obtenir un produit sain et conforme. Les opérations préliminaires sont : le pré-nettoyage, le nettoyage, le conditionnement et finalement la mouture.

11.3. Conditionnement du grain de blé

11.3.1. Pré-nettoyage de grains de blé

Cette étape est appliquée sur le lot de grains bruts issus d'un déchargement. Les grains nuisibles et toxiques sont ainsi écartés avant le stockage dans les silos de réception. Cette étape est essentielle, car elle permet de diminuer les risques de détérioration de la qualité du produit. De ce fait, un contrôle d'hygiène quotidien est nécessaire, notamment sur 'évaluer l'humidité du grain, sa température et le degré d'infestation par les prédateurs (insectes et ravageurs).

11.3.2. Nettoyage de grains de blé

Le nettoyage passe par plusieurs étapes, chacune éliminant un certain type d'impuretés selon leur taille et leur densité. La première étape aide à dégrossir le produit en éliminant les impuretés de grande taille telles que les pierres. La seconde étape élimine les corps étrangers, tels que les grains d'autres espèces comme l'orge, la vesce, les grains cassés,... Enfin, la dernière étape utilise la ventilation ; un courant d'air sert à éliminer des déchets légers comme la paille et la poussière.

11.3.3. Conditionnement de grains de blé

À ce stade, les grains de blé utilisés devraient être totalement purifiés. Le conditionnement comprend deux opérations : le mouillage du grain par l'eau et le temps de repos (Posner, 2003). Le blé est mouillé afin de permettre la diffusion de l'eau dans toutes les parties de la graine (les enveloppes, l'amande ou l'albumen amylicé et le germe).

11.3.4. Broyage du grain

Après que les grains ont reçu des quantités d'eau satisfaisantes et ont été bien reposés, ils sont broyés correctement car les parties périphériques deviennent souples, ce qui permet une meilleure séparation entre l'enveloppe et l'amande (El porai *et al.*, 2013). Cela se répercute essentiellement sur la pureté de la farine. En effet, l'amande commence à s'éclater en farine, dont la réduction est faite progressivement durant le procédé de mouture (Dexter et Sarkar, 2004 ; Boukid *et al.*, 2018). Enfin, la farine extraite est pesée puis convertie en pourcentage pour donner le taux d'extraction, également appelé "rendement en farine".

Chapitre II. Appréciation de la qualité des farines

1. Analyses physico-chimiques

1.1. Taux d'humidité du grain

Le taux d'humidité des grains est un test de base pour évaluer la qualité. Le taux d'humidité est mesuré sur les grains de blé afin de connaître le poids net et la quantité d'eau à ajouter lors du mouillage. De plus, il est mesuré sur la farine afin de respecter la réglementation et de prolonger la durée de conservation du produit. Selon Miric et Peijin (2008), les agriculteurs et les meuniers sont responsables de la conservation de la matière première et du produit fini, afin de fournir un matériel conforme. Cependant, en Algérie, les responsables de la conservation des grains sont la CCLS (Coopérative Céréalière de Légumes Secs) et les meuniers, car la CCLS est le principal fournisseur des meuniers.

Le contrôle de la qualité via l'humidité vise à prévenir les détériorations durant le stockage. Les différences en humidité peuvent être dues aux conditions climatiques, aux pratiques post-récolte et au taux d'extraction. Les cycles avancés de la mouture produisent des quantités importantes d'enveloppes et de couches externes du grain, ce qui influe sur le taux d'humidité et vice-versa (Azizi *et al.*, 2006 ; Mueenuddin *et al.*, 2010).

1.2. Taux de cendres du grain

Le taux de cendres signifie la quantité de matière minérale dans les farines (Feuillet, 2000). Un taux d'extraction élevé produit des farines très riches en particules de son. Inversement, un taux d'extraction faible donne une farine plus blanche (Rababah *et al.*, 2019). La pureté de la farine est jugée par sa teneur en résidus minéraux. Les variations de ce paramètre sont liées aux réglages des cylindres, à la composition interne de la variété, aux conditions de culture et à la fertilité du sol.

1.3. Teneur en protéines du grain

La teneur en protéine du grain est un indice très significatif dans les programmes de sélection de blé et d'autres espèces cultivées. Les protéines présentent un intérêt nutritionnel pour l'alimentation humaine et animale, ainsi qu'un intérêt technologique pour la cuisson du pain (Cherit, 2000). L'accumulation de protéines dans le grain est influencée par des facteurs génétiques et des facteurs agronomiques comme la quantité d'engrais azotés, le stade d'application, la richesse du sol en éléments minéraux et l'effet "année" (Mikhaylenko *et al.*, 2000 ; Edwards, 2010).

1.4. Teneur en gluten humide du grain

Le gluten se forme par le mélange de la farine et de l'eau salée, donnant naissance à une pâte qui doit subir un lavage manuel sous un mince filet d'eau pour éliminer toutes les fractions d'amidon. Le gluten humide résultant est ensuite pesé et ses caractéristiques technologiques sont évaluées.

Le gluten peut absorber jusqu'à trois fois son poids en eau (Shewry et Halford, 2002). La littérature agronomique confirme que la quantité de protéines est réglée par les gènes situés sur le bras court du chromosome 6, ainsi que par les sous-unités de haut poids moléculaire (Glu-1, Glu-A1, Glu B1 et Glu-D1) et de faible poids moléculaires (Glu-A3, Glu-B3, et Glu-D3). Les gènes qui contrôlent la quantité de gluten humide sont localisés sur le bras long et court du chromosome 1 (Usury *et al.*, 2006 ; Plessis *et al.*, 2013).

1.5. Absorption en eau

Les farines commercialisées ont les capacités d'absorption l'eau variable. Chaque farine absorbe la quantité nécessaire pour former une pâte consistante. Le type de blé, la quantité de protéines et la teneur en eau sont des facteurs fortement corrélés à l'absorption en eau. Le pain est le produit qui consomme la plus grande quantité d'eau par rapport aux pâtisseries et aux biscuits.

2. Analyses rhéologiques

La rhéologie est une branche de la physique qui étudie la déformation de la matière. Elle explique également la mécanique des fluides. La rhéologie s'applique dans de nombreux domaines comme tels que l'industrie pharmaceutique, papetière, cosmétique et agroalimentaire.

Dans l'industrie agroalimentaire, la rhéologie concerne principalement l'étude des propriétés de fluidité et de structure des matières premières.

Les applications de la rhéologie sont très importantes dans le domaine de l'industrie agro-alimentaire, où il est courant d'utiliser des matériaux sous forme de poudre ou de pâte. Pour les pâtes à base de farine, l'étude des propriétés rhéologiques est réalisée à l'aide d'un équipement appelé alvéographe.

L'application d'une force mécanique sur les pâtes lors de la manipulation peut modifier leur forme et leurs dimensions, mais grâce au réseau viscoélastique du gluten, la pâte peut retrouver sa forme initiale lorsque la manipulation cesse. Cela permet d'analyser les caractéristiques rhéologiques des pâtes.

L'objectif de ces tests rhéologiques est de prédire le comportement des pâtes ainsi que la qualité des produits fabriqués (Tisoli *et al.*, 2013).

3. Outils d'évaluation de la qualité

La qualité du blé et de ses dérivées est depuis longtemps évaluée pour révéler si elle correspond aux normes établies. Plusieurs tests et mesures sont réalisés, notamment le taux d'humidité, les cendres, les protéines et le gluten humide. De nombreux appareils sont utilisés comme l'étuve, le four à moufle et le Kjeldahl. Les tests durent généralement de 2 à 3 heures pour donner un résultat. Ce qui retarde les résultats est le fait que les responsables chargés du contrôle qualité sont souvent débordés lorsqu'il y a de nombreux échantillons à tester. C'est pour cette raison que les experts ont créé un appareil appelé Inframatic, qui analyse une large gamme de céréales, grains et les produits raffinés, grâce à la technologie infrarouge (Burns et Ciurczak, 2007). L'avantage de cet appareil est la rapidité d'obtention de résultats, dans un laps de temps très court.

Chapitre III : comportement de la culture de blé tendre dans les conditions agro-climatiques semi-arides

1. Contraintes de la production céréalière

La production végétale est exposée à de nombreux facteurs, qui peuvent être classés en deux catégories : les facteurs abiotiques liés principalement aux conditions climatiques, qui affectent l'expression des géotypes ; et les facteurs biotiques, représentés essentiellement par les agents pathogènes tels que les insectes, les champignons et les nématodes, qui peuvent causer des maladies tout au long du cycle de croissance des plantes.

En effet, les précipitations et la température varient selon la région, la saison, l'année, ainsi que selon le stade végétatif de la plante (Belaid, 2015). Quant aux organismes pathogènes, ils se déclinent en une grande diversité de tailles, allant des organismes microscopiques aux macroscopiques. Les champignons, en particulier, sont reconnus pour les dommages qu'ils causent aux cultures sous le nom des "maladies cryptogamiques" (Benbelkacem, 2000).

L'instabilité de la production peut également être imputée à d'autres facteurs, comme le manque de vulgarisation agricole, le semis tardif qui expose les derniers stades de culture aux mois les plus chauds et secs, le décalage entre les dates de semis et de fertilisation, la vétusté des moyens de mécanisation, l'absence de statut foncier, les caractéristiques topographiques et pédologiques, ainsi les types de cultures inadaptés (Benbelkacem, 2022).

1.1. Contraintes abiotiques

Autrement dit, c'est le "stress" que subissent les plantes face aux conditions de leur environnement. La culture de blé tendre dans les régions semi-arides et plus particulièrement dans les hautes plaines, est menacée par des facteurs abiotiques tels que le stress hydrique et le stress thermique, qui sont les plus fréquents (Bahlouli *et al.*, 2005 ; Chennafi *et al.*, 2006 ; Abeledo *et al.*, 2008). Les plantes deviennent stressées lorsque les conditions, notamment climatiques, s'écartent de la normale, avec une baisse ou un excès de température ou de précipitations. La compréhension des phénomènes de stress reste complexe, car leur variation demeure irrégulière et imprévisible.

1.1.1. Stress thermique

1.1.1.2. Basses températures

Les basses températures provoquent des gelées qui coïncident généralement avec le développement des plantes, entraînant la chute des fleurs pendant la floraison. Le gel peut également être très dommageable au stade de levée, pouvant provoquer la rupture du rhizome, supprimant ainsi l'encrage et l'alimentation, et induisant la nécrose des tissus (Soltner, 2005). Les épillets sont aussi touchés par l'effet néfaste du gel, devenant incapables de former des fleurs et

parfois totalement détruits, phénomène connu sous le nom de "coulure" (Frederiks *et al.*, 2008 ; Al-Issawi *et al.*, 2012). Sur le plan phénotypique les dommages apparaissent au stade épiaison, où les épis sont fluets et blanchâtres, généralement vides (Rebbeck *et al.*, 2007).

Au niveau cellulaire, les basses températures entraineront la formation de glace dans les espaces intercellulaires (Livingston *et al.*, 2016). Si le gel est très intense, l'activité biologique des cellules est déséquilibrée, ce qui cause la mort des tissus.

1.1.1.3. Hautes températures

Les températures élevées, dépassant largement les exigences de la plante, occasionnent des dégradations au niveau de l'appareil photosynthétique (Narayanan, 2018). Le blé tendre est très sensible aux températures élevées. Les effets varient selon le stade de développement : au semis, une diminution de la longueur du coléoptile est observée Hazmoune (2000), tandis que pendant la montaison, il y a une limite remarquable pour le nombre de talles par épi (Kajla *et al.*, 2015). Des températures supérieures à 30°C pendant la floraison peuvent causer une stérilité complète du pollen (Iqbal *et al.*, 2017).

La dernière phase de développement correspondant au remplissage du grain, est marquée par des perturbations affectant la graine, soit par l'arrêt de la croissance, soit par la réduction du nombre de grains par m². Ces changements ont pour origine une déshydratation au niveau des cellules, qui accélère par la suite le remplissage, donnant des grains ridés (Karki *et al.*, 2021).

1.1.2. Stress hydrique

Le stress hydrique peut se définir comme l'impossibilité pour la plante de satisfaire ses besoins vitaux en eau, lorsque le milieu de développement est soumis à une sécheresse prolongée ou à une pluviométrie faible ou irrégulière (Mwadzingeni *et al.*, 2016).

Le stress hydrique est l'un des facteurs environnementaux limitant la productivité agricole, non seulement à cause de la rareté de l'eau, mais aussi de sa mauvaise répartition au cours de l'année (Benniou *et al.*, 2018). Le blé, en tant que culture de base dans l'aire céréalière des plaines intérieures est influencé par les effets négatifs de manque d'eau (Ladoui *et al.*, 2020). Les caractères agronomiques de grande valeur, tels que le nombre d'épis, le nombre de grains par épi et le poids de mille grains sont affectés (Ashfaq *et al.*, 2003). L'effet du stress hydrique varie selon les stades phénologiques : un déficit hydrique au stade de montaison réduit la vitesse de croissance des cellules de la tige et provoque une diminution du nombre de talles fertiles. Au stade de floraison, les effets sont plus ou moins importants, pouvant entrainer une réduction du nombre de fleurs fertiles par épillet ou une destruction des organes floraux (Aboughadareh *et al.*, 2020). Pour le remplissage

du grain, le manque d'eau affecte les dimensions de la graine, ce qui se traduit par une réduction du rendement final.

2. Mécanismes d'adaptation

Généralement, les plantes développent plusieurs systèmes de défense pour faire face aux contraintes hydriques. Dans les zones à faibles disponibilités en eau, les plantes peuvent s'adapter en développant certaines tolérances afin d'assurer leur survie et permettre une croissance satisfaisante.

L'adaptation chez les plantes fait intervenir plusieurs paramètres complémentaires : phénologiques, morphologiques et physiologiques (Salehi-Lisar et Bakhshayeshan-Agdam, 2016). Sur le plan phénologique, les plantes surmontent le stress en adoptant des stratégies d'évitement qui leur permettent de raccourcir le cycle pour bénéficier au maximum des ressources disponibles et achever leur cycle dans des conditions modérément stressantes (Reynolds *et al.*, 2005). Le choix de variétés de céréales résistantes avec une croissance rapide constitue une solution clé pour l'augmenter les rendements dans les zones sèches.

L'adaptation morphologique se manifeste sur les différents organes de la plante. Les premières modifications touchent les feuilles. Certaines variétés, en réduisant la surface foliaire, peuvent économiser l'absorption d'eau. D'autres possèdent la capacité d'enrouler leurs feuilles pour diminuer la transpiration (Slafer *et al.*, 2005). Les modifications s'étendent aussi aux racines, avec une augmentation de leur longueur pour qu'elles puissent exploiter les couches humides du sol.

3. Adaptations physiologiques

Sur le plan physiologique, la tolérance consiste à améliorer le pouvoir génétique des plantes via des caractères tels que la teneur relative en eau, l'intégrité cellulaire, la température du couvert végétal et la teneur en chlorophylle, afin d'augmenter les rendements dans des conditions défavorables.

3.1. Durée de la phase végétative

Le développement des plantes se fait par des transitions entre les phases phénologiques. La première et la dernière phase sont communes à tous les végétaux. Elles débutent par la croissance et s'achèvent par la maturation et la récolte des fruits (chez les arbres) ou des grains (chez les céréales et légumineuses). Chaque phase a une durée spécifique, l'ensemble de ces phases correspondant au nombre de jours nécessaires aux plantes pour compléter leur cycle.

Il est reconnu que la phase végétative s'étend de la germination à l'épiaison chez les céréales. Cette phase est différente selon l'espèce et la variété. Par exemple, le pois chiche a une phase végétative plus courte que le blé. Sous stress hydrique, la plante raccourcit son cycle afin d'éviter

les conséquences thermiques de fin de saison. Cette stratégie adoptée par les plantes a pour but de bénéficier de toutes les ressources disponibles et de préserver l'espèce. La durée de la phase végétative est un critère intéressant pour la sélection. En zones arides et semi-arides, les variétés à cycle court sont les plus demandées pour leur rendement en gain. Cependant, les variétés à cycle végétatif long (variétés tardives) sont encore plus recherchées, pour leur élasticité face aux conditions climatiques et leur production en paille.

Poudel *et al.* (2020), dans une étude basée sur l'évaluation du comportement d'un germoplasme de blé en conditions irriguées et non-irriguées, affirment que la durée de la phase végétative est plus longue (78,22 jours) chez les génotypes irrigués et plus courte (60,83 jours) chez les génotypes sous stress hydrique. Dans le même contexte, Chowdhury *et al.* (2021) ont observé une diminution de la durée de la phase d'épiaison variant de (63,54 à 59,23 jours).

3.2. Teneur relative en eau

L'eau est une source indispensable à la vie de tous les êtres vivants. Les plantes ont été classées en deux catégories en fonction de leurs besoins en eau : les hydrophytes comme le riz et les algues, qui nécessitent beaucoup d'eau, et les xérophytes adaptées aux régions sèches, qui n'en nécessitent pas autant. La teneur en eau varie aussi selon les organes ; les feuilles renferment davantage d'eau que les grains. L'eau joue un rôle de réactif essentiel dans la photosynthèse et de solvant pour le transport des gaz et des sels.

En conditions pluviales, les plantes perdent l'équilibre de leur statut hydrique. Selon Kapoor *et al.*, (2020), la diminution de la teneur relative en eau est principalement due à une baisse de vigueur chez la plante. Zada *et al.*, (2022), en étudiant la capacité de rétention en eau en absence et en présence de stress, ont rapporté des diminutions appréciables de la teneur relative en eau sous stress hydrique élevé sur des génotypes de blé tendre. Les pertes en eau enregistrées sont de 73,6 %, 81,9 % et 94,6 % pour des niveaux de stress correspondant à 60 %, 80 % et 100 %. Des résultats de travaux antérieurs confirment l'effet néfaste de la sécheresse sur le statut hydrique de la plante (Almeselmani *et al.*, 2011 ; Kocheva *et al.*, 2013). Les génotypes capables de préserver leur stock d'eau semblent plus tolérants et parviennent à poursuivre leurs activités biologiques tout au long du cycle. De nombreux travaux ont mis en évidence la relation significative entre la teneur relative en eau et le rendement sous stress (ColomVazma, 2003 ; Almeselmani *et al.*, 2006).

3.3. Intégrité cellulaire

Le test de l'intégrité cellulaire mesure le pourcentage de cellules endommagées sous l'effet du stress thermique ou hydrique. Les cellules s'éclatent et perdent leur turgescence, se retrouvent dépourvues de leurs membranes lorsqu'elles sont exposées à des températures vraiment extrêmes.

La tolérance au niveau cellulaire face à la contrainte hydrique peut s'effectuer à travers des mécanismes multiples tels que l'élasticité membranaire, la réduction de la taille cellulaire et la résistance protoplasmique. Ces mécanismes aident à ajuster le potentiel osmotique en cas de déséquilibre. Ainsi, plus le nombre de cellules endommagées est élevé, plus les génotypes sont sensibles. Khalvandi *et al.*, (2021) et Narayanan. (2021) confirment que le stress thermique altère les potentialités des génotypes.

3.4. Température du couvert végétal

La température du couvert végétal donne une indication globale sur la quantité d'eau accumulée dans la feuille drapeau. Les thermomètres sont les outils les plus rapides et plus utiles pour estimer la température en plein champ. Des températures élevées reflètent l'intervention de l'acide abscissique, qui contrôle la fermeture des stomates ; cette fermeture s'accompagne d'une réduction du CO₂ ainsi qu'une diminution de l'activité photosynthétique (Pradhan *et al.*, 2022).

Selon Thakur *et al.*, (2022), les génotypes les plus performants sont ceux qui expriment une grande capacité de la plante à extraire l'eau du sol et à se rafraîchir par transpiration. La température du couvert végétal peut être considérée comme un bon indicateur des stress hydrique et thermique.

3.5. Teneur en chlorophylle

La chlorophylle est le pigment vert présent dans toutes les espèces végétales (plantes herbacées, arbustes et arbres). Ce pigment, omniprésent dans les feuilles, absorbe les rayons du soleil et est converti en métabolites par le biais de la photosynthèse. Selon Manivannan *et al.*, (2007), la teneur en chlorophylle est positivement corrélée avec l'activité photosynthétique.

Zada *et al.* (2022), dans leur caractérisation des génotypes de blé face au stress hydrique, ont observé que la teneur en chlorophylle est de 2,29 mg/ g dans des conditions normales, alors qu'elle variait de 1,97 à 1,10 mg/ g sous stress modéré à sévère. De même, le pigment chlorophyllien "a" diminuait progressivement de 1,04 à 0,54 mg/ g sous stress modéré à sévère, tandis que le pigment chlorophyllien "b" restait à des teneurs faibles à très faibles selon le degré de stress. Plusieurs études antérieures ont également rapporté une diminution du contenu chlorophyllien chez les feuilles soumises à un stress hydrique (Arjenaki *et al.*, 2012 ; Ahmed *et al.*, 2019 ; Hussain *et al.*, 2021 ; Wassaya *et al.*, 2021). Les variétés résistantes parviennent à préserver leur contenu en chlorophylle et à maintenir la synthèse de matière organique, assurant ainsi la survie de la plante (Bala et Sikder, 2017).

3.6. Surface foliaire

Les feuilles transpirent via les stomates afin de renouveler la circulation d'eau dans toute la plante. Ces organes continuent à croître en longueur et en largeur sous l'action d'une phytohormone appelée gibbérellines. Avec le temps, l'approvisionnement en eau et en éléments minéraux favorise le développement et la croissance des feuilles par l'augmentation de la taille des cellules. Sous un stress hydrique, on note une diminution importante des dimensions liées à la surface de la feuille, cette diminution étant une des réponses de défense des végétaux à la déshydratation. Dans la littérature, de nombreux auteurs confirment la petite taille des feuilles (Kazmi *et al.*, (2003) ; Hassan *et al.*, (2022) et Memon *et al.*, (2022).

Alem *et al.* (2002), dans une étude menée sur 7 variétés de blé tendre et 7 variétés de blé dur cultivées dans différents sites qui diffèrent par le degré de salinité de l'eau d'irrigation, ont rapporté que les génotypes de ces deux espèces diminuent leurs surfaces foliaires afin d'atténuer les effets d'un manque d'eau dans les conditions de stress salin. De fait, la réduction des dimensions de la feuille est une stratégie conservatrice d'eau pour minimiser, entre autres, les pertes d'eau par transpiration (Memon *et al.*, 2022). La surface foliaire reste donc un critère important pour le criblage de génotypes vis-à-vis du manque d'eau (Iqbal, 2019).

4. Caractères agronomiques

4.1. Rendement et ses composantes

Le rendement en grain peut être défini comme la quantité de grains récoltés dans une parcelle exploitée. Le rendement est un caractère quantitatif à hérédité complexe (Xie *et al.*, 2015), Il dépend de trois principaux composants, à savoir le nombre d'épis par mètre carré, le nombre de grains par épi et le poids du grain. Ces trois composantes sont influencées par les conditions abiotiques (température, humidité, précipitations, présence de minéraux dans le sol. Cependant, l'état hydrique est le premier facteur limitant qui influe sur chacun de ces trois composants, avant même les minéraux.

La récolte a lieu lorsque les grains atteignent leur maturité complète. Au cours des différents stades de développement, la maturité du grain est indiquée par la diminution de son taux d'humidité. Ce taux d'humidité à maturité complète est entre 14 et 12 % quand le grain devient sec et dur.

Il est à noter qu'en conditions d'humidité normale, les feuilles du blé ont des limbes plats qui exposent leur surface foliaire maximale à la lumière, permettant ainsi aux plantes d'élaborer davantage de matière sèche.

La variabilité du rendement a plusieurs origines. Le milieu (climat et sol) exprime une grande part de cette variabilité, pouvant agir positivement ou négativement sur l'expression d'un génotype (Porfiri *et al.*, 2001 ; Trethowan *et al.*, 2003 ; Del pozo *et al.*, 2014). L'équilibre entre les disponibilités et les besoins demeure un indicateur essentiel de l'augmentation du rendement.

Mollasadeghi *et al.*, (2011), ont noté l'influence du nombre d'épis sur l'expression d'autres caractères liés au rendement, tels que le nombre de grains par épi et poids du grain et donc sur le rendement en grains. Dans cette optique, plusieurs travaux ont analysé les différentes corrélations existantes entre les différents attributs liés au rendement, ce qui est utile pour l'amélioration du blé (Akram *et al.*, 2008 ; Fleury *et al.*, 2010 ; Jatoi *et al.*, 2011).

Chapitre IV : Effet du stress hydrique sur la culture de blé tendre

1. Etude comparative entre les essais expérimentaux au champ et au laboratoire

L'estimation du degré de tolérance lié au stress hydrique se fait soit par la voie conventionnelle, soit par l'expérimentation en plein champ. Ce dernier procédé nécessite une grande surface et requiert de la main-d'œuvre pour la réalisation de toutes les pratiques agricoles, notamment le labour, la préparation du lit de semis, le semis, la fertilisation et le désherbage. L'expérimentation en plein champ dépend des ressources naturelles (pluviométrie et luminosité) pour prospérer. Cependant, elle reste toujours sujette aux changements imprévisibles pour ces deux derniers facteurs.

De plus, l'expérimentation en plein champ exige une longue période. Ainsi, la voie artificielle se déroule *in vitro*, où toutes les conditions de production sont contrôlées, notamment la quantité d'eau, la température et l'humidité. Cette méthode artificielle présente un double intérêt ; elle réduit la durée expérimentale et permet d'obtenir des informations plus précises. Elle n'occupe pas non plus beaucoup d'espace et donne au chercheur la possibilité de réaliser plusieurs essais, qu'ils soient unidisciplinaires ou pluridisciplinaires, sur une période plus courte.

1.1. Le stress artificiel

Le stress hydrique artificiel est provoqué soit par un manque d'arrosage, soit par un arrosage avec des quantités d'eau hétérogène sur les plantes à différentes phases de développement. Ces plantes peuvent être cultivées en plein champ ou sous serre, dans des pots ou des alvéoles, où la durée du stress hydrique est progressivement prolongée (Chaib *et al.*, 2015 ; Desheva et Kyosev, 2015 ; Chehili *et al.*, 2017).

Le stress hydrique artificiel peut être créé en laboratoire par l'utilisation de certains produits chimiques qui diminuent le potentiel hydrique du milieu et empêchent ainsi l'assimilation d'eau par la graine. Parmi ces produits, on peut citer le polyéthylène glycol PEG 6000 (Manoj et Uday, 2007 ; Hernandez *et al.*, 2021). Le stress causé par le PEG est généralement induit au stade juvénile, ce qui entraîne une diminution significative du pourcentage final de germination, de croissance et de biomasse produite (Boudiar *et al.*, 2020 ; Othmani *et al.*, 2021). Le stress hydrique artificiel aide les sélectionneurs à prédire la réponse des génotypes aux différentes conditions de stress hydriques pendant la végétation.

1.2. L'effet du polyéthylène glycol au stade juvénile

1.2.1. Germination

La germination est un phénomène physiologique qui se déclenche lorsque les conditions sont favorables. Cette phase transitoire permet aux graines le passage d'un état de vie ralentie à un état de vie active. Les graines ont besoin de stimulants tels que l'eau, la température, l'oxygène et la lumière pour germer. L'eau est le facteur fondamental qui induit le développement du germe et les réactions biochimiques qui l'accompagnent. La température influe sur les enzymes qui dégradent les réserves, et l'oxygène est essentiel pour la respiration des tissus (oxydation et libération d'énergie).

La germination est influencée à la fois par les propriétés génétiques de la graine elle-même et par les facteurs environnementaux, notamment la taille du grain. Les grains volumineux comme le pois chiche et la lentille germent plus rapidement. D'autres facteurs, comme les conditions de stockage et la qualité des semences, peuvent également affecter la germination (Khayatnezhad *et al.*, 2010 ; Mohammadi et Mojaddam, 2014).

Un stress précoce à la germination peut s'installer lorsque l'humidité du sol est inférieure, lorsque le type du sol a une mauvaise rétention d'eau ou lorsque la date de semis est éloignée de la période de précipitations (Boudiar *et al.*, 2019). De nombreuses études ont montré que l'application du PEG 6000 (stress léger, moyen et sévère) diminue le pourcentage de germination chez le blé (Moayedi *et al.*, 2009 ; Hefny *et al.*, 2020) et chez *Pennisetum divisum* (Altaisan, 2010). Une étude comparative entre deux génotypes de blé dur (Boussellam et Waha) et deux génotypes de blé tendre (Mahon-Démias et Hidhab) a révélé que la diminution du pourcentage de germination est plus prononcée chez les génotypes de blé tendre que les génotypes de blé dur Benderradji *et al.*, (2016). Enfin, la germination reste un critère majeur dans l'évaluation de nouvelles variétés en voie d'inscription au catalogue officiel.

1.2.2. Nombre de racines

Le rôle principal des racines est d'absorber la sève brute à partir de la solution du sol et de la transporter vers tous les organes de la plante (tiges, feuilles et fruits). Le nombre de racines varie en fonction de l'espèce ; les plantes ayant davantage de racines ont la capacité d'absorber une quantité considérable d'eau par rapport aux plantes ayant un nombre réduit de racines, car chaque racine peut prélever une certaine proportion et que la quantité de solution absorbée augmente.

Les conditions de stress obligent les plantes à maintenir leur système racinaire comme outil de résistance (Jones *et al.*, 2009). Certaines plantes stimulent la rhizogénèse, c'est à dire la formation de racines secondaires, pour renforcer leur capacité d'absorption (Bibi *et al.*, 2012).

1.2.3. Longueur des racines

Les racines permettent d'ancrer la plante dans le sol. Les racines longues peuvent atteindre des couches profondes du sol et puiser l'eau. La longueur des racines est un caractère recherché, notamment dans les zones à faible disponibilité en eau, afin de garantir la survie des plantes à travers la croissance de la partie aérienne (Temagout, 2009). La plante soumise à un stress prolongé prolonge le développement de ses racines via certains gènes responsables de la formation de cet organe (Placido *et al.*, 2013).

Dans l'ensemble, le stress modifie la longueur des racines. Cela est confirmé par les travaux de Spanic *et al.*, (2017), Gholamin et Khayatnezhad (2010), et Rida *et al.* (2021). Selon Ayalew *et al.* (2018), la sécheresse au stade juvénile peut causer jusqu'à 50 % de réduction de la longueur des racines. Actuellement, les sélectionneurs essaient d'élargir la gamme des caractères phénotypiques étudiées aux stades primaires de la végétation. Parmi ces caractères, on cite le système racinaire, qui est devenu un paramètre d'intérêt pour l'étude et la valorisation de l'ensemble des espèces cultivées (Abdolshahi *et al.*, 2015 ; Siddiqui *et al.*, 2021). Les résultats des travaux de Kim *et al.*, (2011) ont rapporté des réductions importantes de la longueur des racines chez le Soja.

1.2. 4. Longueur de la première feuille

Les végétaux se distinguent par l'autotrophie. Ils ont la capacité de réaliser la photosynthèse et de produire de la matière organique. Grâce à ce processus, les plantes transforment l'eau et les éléments minéraux sous l'influence de l'énergie solaire en matière organique. La première feuille chez les plantes monocotylédones est le siège de l'élaboration de métabolites nécessaires à la croissance et au développement de la plante. Chen *et al.* (2020) ont trouvé que la taille de la première feuille est positivement et significativement corrélée à la longueur des racines ; lorsque l'environnement est favorable, la croissance des racines et des feuilles se fait en parallèle. Le manque d'eau retarde la croissance foliaire. De nombreuses études ont mis en évidence cette réduction (Githinji *et al.*, 2016 ; Kizilgeci *et al.*, 2017). Asfere *et al.* (2020) ont observé que la longueur de la feuille varie de 12.5 cm en absence de stress à 2.5 cm en présence de stress. Ils ont testé 5 génotypes de blé tendre pour leur tolérance au stress hydrique en utilisant 4 concentrations de PEG (0, 50, 100 et 150 g/l).

1.2.5. Biomasse fraîche totale

La biomasse fraîche totale comprend le poids de la matière fraîche racinaire et aérienne. Le développement de la partie racinaire agit directement sur le développement de la partie aérienne. L'eau est l'élément clé qui dirige le développement des deux parties, les racines étant les premiers organes récepteurs d'eau. Selon leurs nombres et leurs longueurs, la quantité d'eau absorbée influe positivement ou négativement sur le poids de la biomasse aérienne. Ahmed et *al.* (2022) notent la relation existante entre la biomasse fraîche totale et la longueur des racines. Ainsi, ils ont rapporté qu'en condition de stress modéré, la teneur relative en eau a une forte influence sur la production de matière fraîche racinaire et aérienne. Les études dans ce contexte tendent à classer les géotypes en fonction du rapport entre le poids des racines et le poids des feuilles. Mohi-Ud-Din et *al.* (2021) montrent que la biomasse racinaire est plus affectée que la biomasse aérienne.

Partie II :
Expérimentale

CHAPITRE 01

Evaluation de la variabilité génotypique des lignées avancées de blé tendre sous conditions semi-arides

Partie II : Expérimentale

Chapitre 1 : Évaluation de la variabilité génotypique des lignées avancées de blé tendre sous conditions semi-arides

Résumé

La sélection de génotypes présentant des performances améliorées dans des conditions spécifiques, comme les zones semi-arides, repose sur la reconnaissance et l'utilisation de la variabilité phénotypique pour améliorer les caractéristiques adaptatives des cultures. Cette étude a été réalisée au cours des campagnes agricoles 2020/21 et 2021/22 avec pour objectif d'estimer les paramètres de la variation génétique parmi onze caractères quantitatifs du blé tendre. Trente-quatre génotypes, dont quatre témoins, ont été expérimentés sous conditions pluviales des zones semi-arides d'altitude suivant un dispositif en blocs aléatoires complets avec trois répétitions. Les génotypes ont montré des variations significatives pour l'ensemble des caractères à l'exception de la teneur relative en eau (TRE), l'intégrité cellulaire (IC) et la température du couvert végétal (TCV). Le comportement des génotypes évalués a différencié selon l'environnement d'étude, d'où les moyennes minimales et maximales des caractères mesurés ont fortement varié selon le génotype, l'environnement et leur interaction. L'héritabilité au sens large de l'analyse combinée est élevée pour la teneur en chlorophylle (CHL), moyenne pour la surface foliaire de la feuille étendue (SF) et la hauteur de la végétation (HT), et faible pour le reste des variables. L'indice de variation CV_G/CV_E est inférieur à l'unité pour l'ensemble des caractères suggérant l'effet substantiel de l'environnement dans leur expression. Le rendement en grains est fortement associé au nombre d'épis ($r = 0.801^*$) et au poids des épis ($r = 0.924^*$) en 2020/21 et au poids des épis ($r = 0.769^*$) et au poids de mille grains ($r = 0.445^*$) en 2021/22. La lignée L18 a présenté un avantage considérable en termes de rendement en grains au cours des deux campagnes d'étude, ce qui en fait l'un des candidats potentiels pour un suivi particuliers dans la suite de ce programme de sélection.

Mots clés : *Triticum aestivum*, héritabilité, sélection, corrélation, rendement, semi-aride.

Introduction

Le blé tendre (*Triticum aestivum* L.) est une espèce largement cultivée dans le monde entier. Il se différencie fortement des autres céréales par la qualité de ses protéines qui deviennent cohérente lors du pétrissage, permettant ainsi la fabrication de certains produits destinés à la panification (Khalid *et al.* 2023). Le blé tendre a de nombreuses applications pour répondre aux exigences du secteur industriel, ce qui en fait une céréale à haut niveau de consommation (Zorb *et al.*, 2018). Les besoins de la population local obligent les politiques agricoles à importer massivement du blé tendre auprès de plusieurs fournisseurs afin d'éviter une éventuelle pénurie (Bekkis *et al.*, 2022).

La production de blé tendre dans les hautes plaines sétifiennes tend à diminuer en raison de facteurs qui limitent les potentialités des cultivars dans cette zone (Bachiri *et al.*, 2018). Ces facteurs peuvent être répartis en deux catégories : les facteurs non maîtrisables liés au climat, où les variations de température et de précipitations constituent les principales menaces perturbant cette culture (Benbelkacem, 2022). Les facteurs maîtrisables sont ceux liés à l'agriculteur, tels que la date de semis, la période de fertilisation, la dose d'engrais appliquée, le désherbage, le respect de l'itinéraire technique et le choix variétal (Chabane et Bousard, 2012).

Le choix variétal en termes de rendement est une étape essentielle pour le sélectionneur (Nouri *et al.*, 2011 ; Madic *et al.*, 2012 ; Rabti, 2021). Les variétés ayant la capacité de produire une quantité maximale de grains dans les conditions de stress sont plus prometteuses que celles productives en conditions irriguées (Pour-Aboughadreh *et al.*, 2020). L'avantage de la première catégorie de génotypes est qu'ils tolèrent la contrainte du climat tout en donnant un rendement appréciable. La sélection dans ce sens est une sélection bi-caractères à double intérêt.

En amélioration des plantes, tout programme de sélection, que ce soit pour le blé tendre ou pour toute autre culture, repose sur la variabilité phénotypique qui fait référence à la diversité des caractères observables ou mesurables parmi les individus d'une population donnée (Malbhave *et al.*, 2020). Cette variabilité peut être naturelle, c'est-à-dire présente dans la diversité génétique de la culture, ou elle peut être induite par des croisements ou des traitements spécifiques tels que les mutations (Sadia *et al.*, 2020). Dans les zones semi-arides où le stress hydrique est le principal facteur limitant de la productivité agricole, les sélectionneurs évaluent souvent un large éventail de caractères phénotypiques pour identifier ceux qui sont les plus souhaitables (Fellahi *et al.*, 2020 ; Benbelkacem, 2022 ; Hannachi et Fellahi, 2023). Cela peut inclure des traits phénologiques, morphologiques, physiologiques, biochimiques et agronomiques qui varient d'un cultivar à l'autre. La variabilité phénotypique est alors le résultat des différences génétiques entre ces cultivars, ainsi que de l'influence de l'environnement dans lequel ils sont cultivés (Saglam *et al.*, 2010 ; Awan *et al.*, 2015 ; Mwadzingeni *et al.*, 2016 ; Prasad *et al.*, 2020). Une diversité génétique élevée signifie

que les individus réagissent différemment à une contrainte extérieure (Raza *et al.*, 2019). Ce qui permet d'assurer la reproduction et le transfert de gènes des parents aux descendants. A l'inverse, une faible diversité génétique reflète la faible variation ou la similitude chez l'espèce étudiée, ce qui réduit les chances du sélectionneur pour identifier les individus élites (Araus et Cairns, 2014 ; Fellahi *et al.*, 2019).

Une fois que les caractères souhaitables sont identifiés, les individus présentant ces caractères de manière supérieure sont sélectionnés pour être utilisés comme parents ou géniteurs dans les programmes de croisement (Kirouani *et al.*, 2019 ; Rabti *et al.*, 2020). En croisant des individus sélectionnés avec des caractères souhaitables, on combine leurs gènes et leur variabilité phénotypique pour créer une nouvelle génération qui possède un potentiel de performance amélioré. Le processus de croisement et d'évaluation est répété sur plusieurs générations pour affiner les traits souhaitables et augmenter la fréquence des gènes favorables (Frankin *et al.*, 2020). Les générations résultantes du croisement sont ensuite évaluées pour leurs caractères phénotypiques (précocité, hauteur de la plante, surface foliaire, nombre d'épis, longueur de l'épi, nombre de grains par épi, poids du grain, tolérance à la sécheresse, résistance aux maladies, composition nutritionnelle,...) afin de sélectionner les individus ou les lignées les plus performants, présentant donc les traits les plus souhaitables pour les conditions semi-arides, ce qui contribuera à améliorer le rendement et la résilience des cultures dans ces environnements difficiles (Salmi *et al.*, 2019 ; Hannachi et Fellahi, 2023).

Pour que la sélection des caractères spécifiques, tels que la tolérance à la sécheresse, ou d'autres traits importants, soit efficace dans un programme d'amélioration du blé tendre, il est essentiel de comprendre le déterminisme génétique, l'héritabilité et la variabilité présente dans les populations en ségrégation (Fellahi *et al.*, 2019 ; Dragov *et al.*, 2022). En combinant la connaissance de ces paramètres, les sélectionneurs peuvent mettre en œuvre des stratégies de sélection plus ciblées et plus efficaces pour améliorer les caractères souhaitables chez l'espèce considérée (Regmi *et al.*, 2021 ; Gebremariam *et al.*, 2022 ; Geneti *et al.*, 2022). Cela permet d'obtenir des variétés de blé mieux adaptées aux conditions semi-arides et à d'autres environnements stressants, contribuant ainsi à la sécurité alimentaire et à la résilience agricole dans ces régions.

Ce travail a pour objectif d'analyser la variabilité génétique, d'estimer les paramètres génétiques impliqués dans l'expression des caractères liés à la performance agronomique et à la tolérance aux stress abiotiques chez des lignées avancées de blé tendre évaluées en conditions pluviales sous environnement semi-aride des hautes plaines sétifiennes.

Matériel et Méthodes

1. Sites expérimentaux

L'expérimentation a été menée durant les campagnes agricoles 2020/21 et 2021/22 dans des conditions pluviales. Pendant la première année, l'essai a été installé sur le site expérimental de l'Institut National de Recherche Agronomique d'Algérie (INRAA), unité de recherche de Sétif située aux coordonnées géographiques 36°09'N ; 05°22'E à une altitude de 970 m au-dessus du niveau de la mer. Pendant la deuxième année, l'essai a été mené sur les terres de l'Institut Technique des Grandes Cultures (ITGC), Ferme de Démonstration et de Production de Semences (FDPS) de Sétif localisée aux coordonnées 36°09' N ; 5°22'E à une altitude de 964 m.

Le premier site présente une texture argilo-limoneuse (44% argile, 44% limon, 12% sable) et une teneur en matière organique de 1.05% (Données internes de l'INRAA). Le deuxième site de l'ITGC se caractérise par un sol basique calcaire, avec une texture argileux-limono sableux et un taux moyen en matière organique de 2.13% (Boulaaras, 2024).

La répartition mensuelle des précipitations et des températures moyennes enregistrées au cours des deux campagnes d'étude sont présentées en figure 2. Le cumul pluviométrique enregistré pour la période allant de septembre à juin était de 320.24 mm et 330.46 mm, respectivement pour les campagnes 2020/21 et 2021/22. Bien que les quantités globales des pluies observées sur les deux sites soient presque similaires, la différence apparaît surtout au niveau de leur répartition au cours du cycle cultural. Ainsi, les mois de septembre, novembre, février et avril furent plus pluvieux en 2021/22. Les mois de décembre et mai étaient, quant à eux, plus pluvieux en 2020/21 et secs à moins pluvieux en 2021/22.

Les températures moyennes des deux campagnes d'étude sont élevées en début d'automne et en été, et basses en hivers. Avril, mai et juin connaissent une élévation importante de la température de l'air, avec des moyennes de 13.3, 18.7 et 25.4°C en 2020/21 et 11.7, 17.8 et 27.1°C en 2021/22. Ce phénomène est généralement la cause principale du stress thermique qui pousse la végétation à terminer son cycle plus rapidement, raccourcissant ainsi la durée de la phase de remplissage du grain (Rabti, 2021). Inversement, des températures plus basses (6 et 6.1°C 2020/21 contre 6.4 et 4.3°C en 2021/22) sont constatées durant les mois de décembre et janvier, dont la température moyenne mensuelle reste inférieure à 10°C, seuil estimé favorable à la croissance et le développement de la culture de blé.

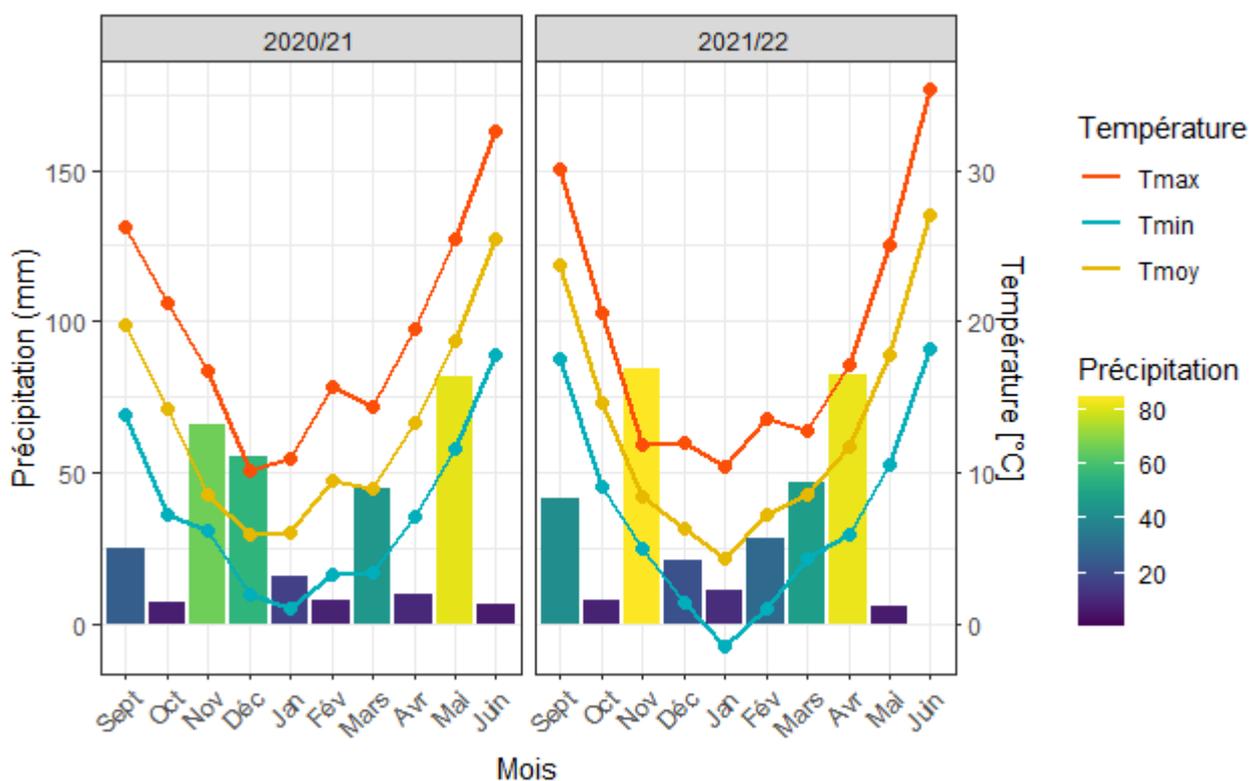


Figure 2 : Moyennes mensuelles des précipitations et températures, enregistrées durant les campagnes d'étude (<https://fr.tutiempo.net/>).

2. Matériel végétal

Le matériel végétal est composé de 34 géotypes de blé tendre, dont 30 lignées avancées et quatre géotypes nommés Mawna, Hidhab, Rmada et Acsad₁₁₃₅, utilisés comme des témoins (Tableau 2).

Les lignées avancées font partie du programme de sélection de l'INRAA et ont été développées par sélection pédigrée après croisements comme indiqué en tableau 1. Les trois premiers témoins sont des variétés inscrites au catalogue algérien et sont largement commercialisées et cultivées en Algérie (Fellahi, 2017).

3. Dispositif expérimental

L'expérimentation a été conduite dans un dispositif en blocs aléatoires complets (DBAC) avec trois répétitions. Pendant les deux campagnes agricoles, le semis a été réalisé en décembre à l'aide d'un semoir expérimental de type Hege 80 à une densité de 350 graines/m². Le précédent cultural est une jachère travaillée.

La parcelle élémentaire comprend 6 rangs de 5 m de long, espacés de 0.2 m soit une surface parcellaire de 6 m² (Photo 1). Les deux essais ont été fertilisés avec 100 Kg/ha de MAP (phosphate monoamonique 52 % P₂O₅ + 12 % N) avant le semis de la culture, et 75 kg/ha d'urée (46 % N) au

stade plein tallage. Les mauvaises herbes ont été maîtrisées chimiquement par l'utilisation de l'herbicide Topik anti-monocotylédones (0.75 l/ha) et le Zoom anti-dicotylédone (150 g/ha).

Tableau 2 : les lignées avancées et témoins de blé tendre évalués dans cette étude.

No	Code	Géotype	No	Code	Géotype
1	L1	Acsad ₁₁₃₅ * Rmada	18	L15	Ain Abid * Hidhab
2	T1	Mawna	19	L16	Mawna * Rmada
3	L2	Djanet * Hidhab	20	L17	Ain Abid * Rmada
4	L3	Acsad ₁₀₆₉ * Hidhab	21	L18	Acsad ₁₀₆₉ * Hidhab
5	T2	Hidhab	22	L19	Acsad ₁₀₆₉ * Hidhab
6	L4	Acsad ₁₀₆₉ * EL-Wifak	23	L20	Acsad ₁₁₃₅ * Mahon-Demias
7	L5	Djanet * Rmada	24	L21	Acsad ₉₀₁ * Mahon-Demias
8	L6	Djanet * Hidhab	25	L22	Ain Abid * Hidhab
9	L7	Djanet * EL-Wifak	26	L23	Djanet * Rmada
10	L8	Djanet * EL-Wifak	27	L24	Acsad ₁₀₆₉ * EL-Wifak
11	L9	Acsad ₁₀₆₉ * EL-Wifak	28	L25	Djanet * Rmada
12	L10	Ain Abid * EL-Wifak	29	L26	Ain Abid * Rmada
13	L11	Acsad ₁₀₆₉ * EL- Wifak	30	L27	Acsad ₁₁₃₅ * Rmada
14	L12	Acsad ₁₀₆₉ * Rmada	31	L28	Acsad ₁₀₆₉ * Hidhab
15	L13	Acsad ₁₀₆₉ * Mahon-Démias	32	L29	Acsad ₁₀₆₉ * Hidhab
16	T3	Rmada	33	L30	Acsad ₁₁₃₅ * Rmada
17	L14	Djanet * Rmada	34	T4	Acsad₁₁₃₅

Remarque : Les géotypes ayant le même pédigrée sont des lignées sœurs, les témoins sont indiqués en gras.



Photo 1 : Vue générale de l'essai installé au cours de la campagne agricole 2020/21 sur le site de l'INRAA, unité de Sétif (Photo prise le 25/04/2021).

4. Mesures et notations

Dans le cadre de ce travail, onze caractères qui représentant la phénologie, la physiologie et la performance agronomique de différents génotypes de blé ont été évalués.

4.1. Caractères phéno-morphologiques

4.1.1. Durée de la phase végétative

La durée de la phase végétative (DPV, en jours) correspond au nombre de jours calendaires entre le premier janvier et la date d'épiaison, définie comme le moment où 50 % des épis sont sortis de la gaine de la feuille étendard.

4.1.2. Surface foliaire de la feuille étendard

La surface foliaire de la dernière feuille (SF, en cm²) a été déterminée à partir d'un échantillon de cinq feuilles. La longueur (L) et la plus grande largeur (l) de ces feuilles ont été mesurées, puis la superficie a été calculée à l'aide de la formule de Spagnoletti-Zeuli et Qualset (1990) :

$$\text{SF (cm}^2\text{)} = 0.749 (\text{L} \times \text{l})$$

4.2. Caractères physiologiques

Les mesures concernant les caractères physiologiques ont été prises sur la feuille étendard au stade épiaison.

4.2.1. Teneur relative en eau

La teneur relative en eau (TRE, en %) a été déterminée à l'épiaison selon la méthode décrite par Pask *et al.* (2012). Cinq feuilles indicatrices ont été prélevées et pesées pour obtenir le poids frais (PF). Elles ont ensuite été placées dans des tubes à essai contenant 10 ml d'eau distillée, puis maintenues dans l'obscurité pendant 24 heures avant d'être testées pour obtenir le poids turgide (PT) (Photo 2). Enfin, les échantillons de feuilles ont été séchés à l'étuve à 80°C pendant 48 heures pour déterminer le poids sec (PS). La TRE a été calculée comme suit :

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



Photo 2 : Echantillons de feuilles testées pour obtenir leur teneur en eau.

4.2.2. Intégrité cellulaire

L'intégrité cellulaire (IC, en %) ou le taux des dommages cellulaires induits par le stress thermique a été déterminée sur les feuilles drapeaux complètement développées selon la procédure décrite par Bajji et *al.* (2001). Deux feuilles ont été prélevées de manière aléatoire pour chaque génotype, puis lavées à l'eau du robinet et à l'eau distillée pour éliminer la poussière adhérente. Elles ont ensuite été découpées en segments de 1 cm de longueur. Dix segments ont été placés dans des tubes contenant 10 ml d'eau doublement distillée. Les tubes ont été placés à la température ambiante du laboratoire et agités périodiquement et manuellement. Une première mesure de leur conductivité électrique a été enregistrée après 24 heures (EC_1) à l'aide d'un conductimètre de laboratoire (HI 2300 EC/ TDS/NaClMeter, Hanna Instruments), Photo 3. Les tubes sont ensuite placés dans un bain-marie à 100 °C pendant 1heure, puis leur conductivité a été à nouveau enregistrée (EC_2). L'IC a été calculée comme suit :

$$IC (\%) = 100 \times (EC_1 / EC_2)$$



Photo 3 : Echantillons de feuilles placées dans des tubes à essais remplis de 10 ml d'eau distillée (à gauche) et mesure de leurs conductivités (à droite).

4.2.3 Température du couvert végétal

Les températures de la canopée ont été mesurées entre 12 h et 14 h, lors d'une journée ensoleillée, à l'aide d'un thermomètre infrarouge portable (Fluke Corporation, Everett, WA, Etats – Unis). Trois mesures ont été effectuées par parcelle, à environ 0.5 m de la bordure de la parcelle.

4.2.4. Teneur en chlorophylle des feuilles

La teneur en chlorophylle (CHL, Spad) a été déterminée sur trois feuilles indicatrices choisies au hasard dans chaque parcelle à l'aide d'un chlorophylle-mètre portable de type SPAD-502 (Minolta Co. Ltd, Tokyo, Japon).

4.3. Caractères agronomiques

4.3.1. Hauteur de la végétation

La hauteur de la plante (HT, en cm) a été mesurée juste avant la récolte. Elle est prise de la surface du sol jusqu'au sommet de l'épi, barbes non incluses, à l'aide d'un ruban-mètre. Trois mesures ont été effectuées à différents endroits de la parcelle élémentaire et leur moyenne représente la valeur parcellaire.

4.3.2. Rendement en grain, poids des épis et nombre d'épis

Le rendement en grain (RDT, en g/m^2), le poids des épis (PE) et le nombre d'épis (NE) ont été déterminées après la récolte d'un échantillon de végétation d'un mètre linéaire pour chaque génotype. Les valeurs sont ensuite reconverties en g/m^2 et représentent les valeurs parcellaires des variables considérées.

4.3.3. Poids de mille grains

Le poids de mille grains (PMG, en g) a été obtenu après le battage des épis à partir d'un échantillon de 250 graines par parcelle.

5. Analyse des données

Les données collectées pour les caractères mesurés ont été soumises à une analyse de la variance (ANOVA) à deux facteurs (génotype et année) au seuil de probabilité de 5%. La comparaison des effets des traitements (génotypes, années et leurs interactions) est faite en référence à la plus petite différence significative au seuil de 5% ($P_{pds5\%}$). La variance génotypique, le coefficient de variation génotypique, l'héritabilité au sens large et le ratio du coefficient de variation génotypique par rapport au coefficient de variation environnementale (années) ont été calculés pour chaque trait en fonction des valeurs quadratiques moyennes obtenues à partir de

l'ANOVA. Les corrélations phénotypiques et génotypiques pour chaque paire de caractères ont été calculées selon la procédure décrite par Mansouri *et al.* (2018). Toutes les analyses statistiques ont été effectuées à l'aide des logiciels Genes (Cruz, 2013) et les figures ont été visualisées à l'aide du package 'ggplot2' dans le programme RStudio, version 2023.03.1 (Wickham, 2016).

Résultats et discussion

1. Etude de la variabilité des caractères mesurés

1.1. Caractères phéno-morpho-physiologiques

L'analyse de la variance (ANOVA) a révélé des effets très hautement significatifs entre les génotypes étudiés pour la durée de la phase végétative, la teneur en chlorophylle, la surface foliaire de la feuille étendard et la hauteur de la plante. Inversement, des effets non significatifs sont notés pour la teneur relative en eau, l'intégrité cellulaire et la température du couvert végétal ce qui reflète la similarité de réponse des génotypes testés pour ces traits (Tableau 3). Ces résultats sont en accord avec les observations rapportées par Ahmed *et al.* (2020) et Lamara *et al.* (2022), qui ont souligné une variabilité notable des caractères phéno-morpho-physiologiques entre différents génotypes de blé tendre.

Tableau 3: Carrés moyens de l'analyse de la variance des caractères phéno-morpho-physiologiques.

SV	Bloc	Génotype (G)	Année (A)	G * A	Erreur	CV (%)
Ddl	2	33	1	33	134	
DPV	6.18**	12.68***	1615.08***	10.30***	1.25	0.92
TRE	65.59 ^{ns}	34.69 ^{ns}	2279.46***	28.06 ^{ns}	23.8	6.39
IC	2.52 ^{ns}	21.83 ^{ns}	273.67***	32.09*	17.92	4.53
TCV	41.02***	3.36 ^{ns}	1245.67***	2.69 ^{ns}	3.22	5.92
CHL	5.37 ^{ns}	41.73***	500.71***	12.85***	4.88	4.68
SF	2.08 ^{ns}	26.40***	1254.61***	16.52***	7.45	18.95
HT	5.06 ^{ns}	127.55***	111393.57***	77.37***	25.43	7.41

DPV : Durée de la phase végétative, TRE : Teneur relative en eau, IC : Intégrité cellulaire, TCV : Température du couvert végétal, CHL : Teneur en chlorophylle, SF : surface foliaire, HT : Hauteur de la végétation. CV : Coefficient de variation. ns, * et *** : effets non significatifs et significatifs au seuil de 5% et 0.1%, respectivement.

L'année agricole a eu une influence majeure sur la variation des caractères, avec des effets très hautement significatifs observés pour l'ensemble des traits analysés. Cela met en évidence l'importance des conditions environnementales dans l'expression phénotypique (Tableau 3), conformément aux résultats de Mohammadi *et al.* (2018) sur le blé et de Bendada (2020) sur l'orge.

L'interaction "génotype × année" s'est révélée significative à très hautement significative pour la plupart des caractères, à l'exception de la teneur relative en eau et de la température du couvert végétal, pour lesquelles aucun effet significatif n'a été détecté. Ces observations sont cohérentes avec celles de Hamam et Khaled (2009), Tripura et al. (2011) et Sharma *et al.* (2019), confirmant l'influence notable de l'année agricole et la complexité de l'interaction génotype × environnement dans l'expression des caractères phénotypiques du blé.

1.2. Rendement et ses composantes

L'ANOVA a révélé un effet génotypique très hautement significatif pour toutes les composantes du rendement étudiées, ce qui traduit une importante variabilité génétique parmi les génotypes testés (Tableau 4). Ces résultats corroborent ceux rapportés par Sohail *et al.* (2018), Dabi *et al.* (2019) et Seyoum et Sisay (2021), qui ont mis en évidence une large diversité génétique concernant le rendement et ses composantes chez le blé. À l'exception du poids de mille grains (PMG), l'effet de l'année agricole s'est avéré très hautement significatif pour les autres caractères, soulignant le rôle déterminant des conditions climatiques sur leur expression (Tableau 4). Des résultats similaires ont été obtenus par Rabti (2021) et Mekaoussi (2022). L'interaction "génotype × année" a également montré des effets hautement à très hautement significatifs pour toutes les composantes du rendement. Ces résultats sont en ligne avec ceux rapportés par Ozturk *et al.* (2021) et Pandey *et al.* (2021), mettant en évidence la modulation de l'expression du rendement par les effets combinés du génotype et des conditions environnementales.

Tableau 4 : Carrés moyens de l'analyse de la variance combinée du rendement et ses composantes.

SV	Bloc	Génotype (G)	Année (A)	G * A	Erreur	CV (%)
Ddl	2	33	1	33	134	
NE	913.66 ^{ns}	3601.84 ^{***}	334651.5 ^{***}	2745.2 ^{**}	1437.35	27.37
PE	638.43 ^{ns}	746.71 ^{***}	21969.06 ^{***}	672.57 ^{***}	182.19	23.03
PMG	71.90 [*]	40.31 ^{***}	34.68 ^{ns}	37.56 ^{***}	16.55	14.86
RDT	197.84 ^{ns}	117.93 ^{***}	18005.71 ^{***}	164.41 ^{***}	65.16	24.27

NE : Nombre d'épis, PE : Poids d'épis, PMG : Poids de mille grains, RDT : Rendement en grains. ns, ** et *** : effets non significatifs et significatifs au seuil de 5%, 1% et 0.1%, respectivement.

La figure 3 illustre les proportions des contributions relatives des différentes sources de variation à la variabilité des caractères mesurés. L'effet "génotype" explique, respectivement, 59.55%, 35.16% et 48.40% de la variation observée pour la teneur en chlorophylle (CHL), le poids des épis (PE) et le poids de mille grains (PMG). Le reste de la variation pour ces caractères est partagé entre l'effet "année" et l'interaction "génotype * année".

Pour les autres caractères, la source de variation "année" apparaît comme prépondérante, expliquant 70 % de la variation pour la durée de la phase végétative (DPV), 50.87 % pour la teneur relative en eau (TRE), 81.56 % pour la température du couvert végétal (TCV), 46.90 % pour la surface foliaire (SF), 94.27 % pour la hauteur des tiges (HT), 61.30 % pour le nombre d'épis (NE) et 64,96 % pour le rendement en grains (RDT). En ce qui concerne l'intégrité cellulaire (IC), c'est l'interaction "génotype × année" qui explique la plus grande part de la variance (51.45 %), les effets "génotype" et "année" contribuant au reste. Ces résultats confirment le rôle dominant de l'année agricole dans l'expression phénotypique des caractères étudiés, soulignant l'importance de l'adaptation des génotypes aux conditions environnementales variables.

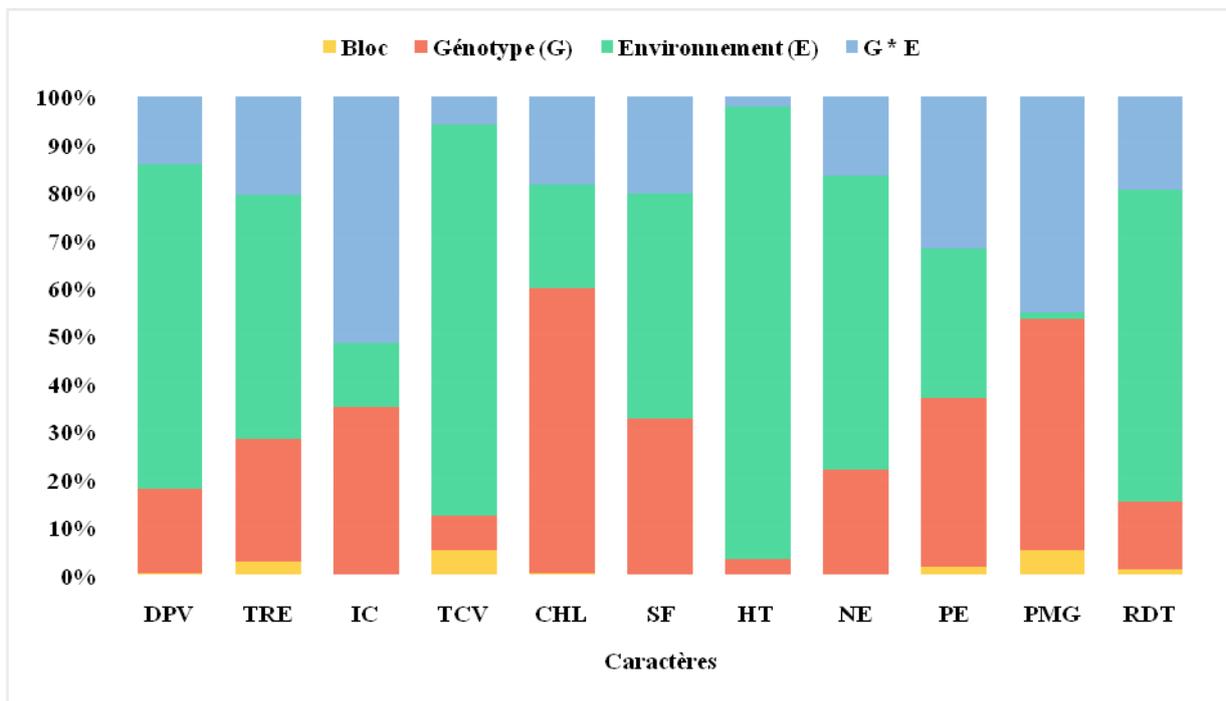


Figure 3 : Contribution des différentes sources de variation dans la variabilité observée au niveau des caractères mesurés.

2. Etude des valeurs moyennes des caractères mesurés

2.1. Effet moyen "année"

Les valeurs moyennes des caractères étudiés pour chaque année agricole sont données dans le tableau 5.

La durée de la phase végétative (DPV) varie de 124.4 jours en 2020/21 à 118.8 jours en 2021/22. La teneur relative en eau (TRE) passe de 73.0% en 2020/21 à 79.7% en 2021/22. Les moyennes de l'intégrité cellulaire (IC) sont de 92.2 en 2020/21 et 94.5% en 2021/22. Les Température du couvert végétal (TCV) sont de 27.8°C en 2020/21 et 32.8°C en 2021/22. Les moyennes en chlorophylle (CHL) sont de 45.7 Spad en 2020/21 et 48.8 Spad en 2021/22. La surface foliaire (SF) passe de 11.9 cm² en 2020/21 à 16.9 cm² en 2021/22.

La hauteur des plantes (HT) évolue de 44.7 cm 2020/21 à 91.5 cm en 2021/22. Le nombre d'épis par mètre carré (NE/m²) diminue de 179.0 épis en 2020/21 à 98.0 épis en 2021/22. Le poids des épis (PE) augmente de 96.5 q/ha en 2020/21 à 138.0 q/ha en 2021/22. Le poids de mille grains (PMG) passe de 27.0 g en 2020/21 et 27.8 g en 2021/22. Le rendement en grains (RDT) évolue de 47.7 q/ha en 2020/21 à 85.3 q/ha en 2021/22.

La campagne 2021/22 semble plus favorable à l'expression de ces caractères. Ces résultats suggèrent que les différences entre campagnes en termes de conditions climatiques engendrent des différences significatives dans l'expression des caractères étudiés, notamment pour la DPV, la CHL, la SF, la HT, le NE, le PNE, le PMG et le RDT, qui expriment un effet année agricole hautement significatif et une interaction importante "génotype * année agricole" hautement à très hautement significative (Tableaux 3 et 4). Les différences en valeurs absolues, entre les deux campagnes sont de 5.6 jours pour la DPV, 6.7% pour la TRE, 2.3% pour l'IC, 4.9°C pour la TCV, 3.1 Spad pour la CHL, 5.1 cm² pour la SF, 46.7 cm pour la HT, 81.0 épis pour le NE/m², 41.5 q/ha pour le PE, 0.8 g pour le PMG et 37.6 pour le RDT (Tableau 5).

Tableau 5 : Valeurs moyennes des caractères mesurés en 2020/21 et 2021/22 chez les 34 génotypes de blé tendre évalués.

Campagne	DPV	TRE	IC	TCV	CHL	SF	HT	NE/m ²	PE	PMG	RDT
2020/21	124.4	73.0	92.2	27.8	45.7	11.9	44.7	179.0	96.5	27.0	47.7
2021/22	118.8	79.7	94.5	32.8	48.8	16.9	91.5	98.0	138.0	27.8	85.3
Différence	5.6	6.7	2.3	4.9	3.1	5.0	46.7	81.0	41.5	0.8	37.6
Ppds_{5%}	0.31	1.35	1.17	0.50	0.61	0.76	1.40	10.50	3.74	1.13	2.24

DPV : Durée de la phase végétative, TRE : Teneur relative en eau, IC : Intégrité cellulaire, TCV : Température du couvert végétal, CHL : Teneur en chlorophylle, SF : surface foliaire, HT : Hauteur de la végétation, NE : Nombre d'épis, PE : Poids d'épis, PMG : Poids de mille grains, RDT : Rendement en grains.

2.2. Effet moyen "génotype"

Les valeurs moyennes de l'effet du génotype varient selon l'année agricole dans lequel ces génotypes sont évalués.

2.2.1. Durée de la phase végétative

Lors de la première campagne d'étude 2020/21, les lignées L11, L24, L26 et L27 ont présenté le cycle végétatif le plus court, étant ainsi les plus précoces avec une durée de la phase végétative (DPV) n'excédant pas 123 jours (Figure 3). D'un autre côté, les lignées L29 avec 129 jours et L16 avec 129.3 jours sont les plus tardives (Figure 4). Il s'est avéré que les témoins se répartissent entre les deux bornes de l'intervalle dans lequel les lignées sont incluses.

La deuxième campagne a révélé un raccourcissement du cycle végétatif par rapport à la première année agricole, exprimé par une réduction des valeurs mesurées pour l'ensemble des lignées étudiées. Ainsi, Le cycle végétatif le plus court a été observé chez la lignée L7 (115.7 jours), tandis que le plus long a été noté chez L22 (124.3 jours). Le témoin T1 et les deux lignées L11 et L12 ont présenté une durée proche à celle de la lignée la plus précoce, avec 116 jours (Figure 4).

Ces résultats offrent aux sélectionneurs la possibilité d'isoler des individus à cycle végétatif court, leur permettant d'accomplir leur cycle avant l'installation du stress de fin de cycle. C'est le cas de la lignée L7, qui s'est montrée précoce pendant les deux campagnes d'étude, et semble donc porteuses des gènes de précocité.

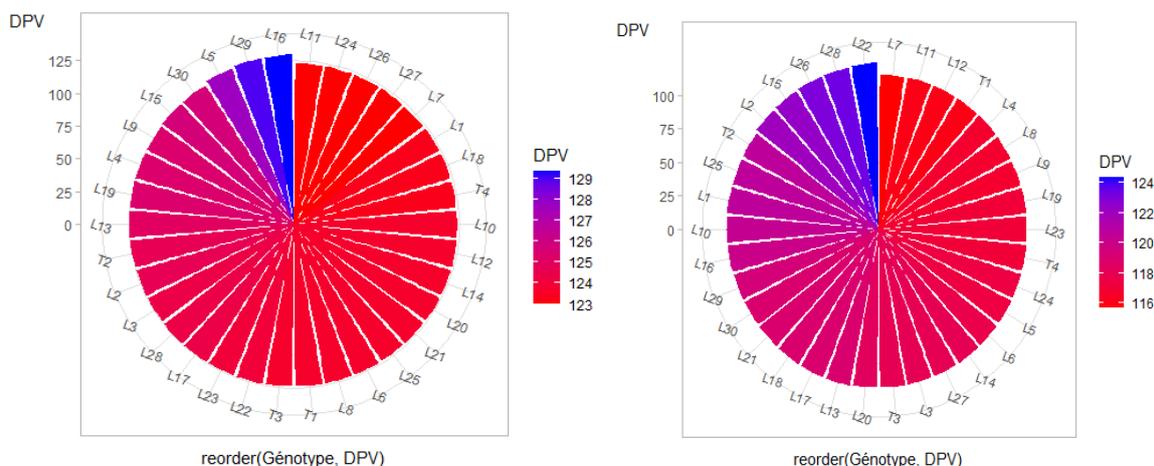


Figure 4 : Variation de la durée de la phase végétative chez les génotypes de blé tendre étudiés durant les campagnes agricoles 2020/21 (à gauche) et 2021/22 (à droite).

2.2.2. Teneur relative en eau

Les lignées L27 (67.2 %), L21 (68.2 %), et le témoin T4 (69.5 %) présentent une très faible quantité d'eau stockée dans les feuilles étendards parmi le matériel végétal évalué lors de la campagne 2020/21 (Figure 4). En revanche, les lignées L10 (76.7 %) et L2 (76.4 %), ainsi que le T3 (76.5 %) montrent les teneurs en eau les plus élevées dans les feuilles. Pendant l'année 2021/22, on enregistre une faible teneur en eau chez les lignées L25 (65.1 %) et L4 (72.8 %), alors que les lignées L1 (84.6 %), L14 (84.5 %) et L10 (84.1 %) présentent respectivement les quantités maximales (Figure 4). Il semble évident que la différence dans le statu hydrique est très observable entre les deux campagnes, en raison de l'effet significatif de la source de variation "environnement" comme le montrent les résultats de l'ANOVA. En comparant les moyennes génotypiques au cours des deux campagnes d'étude, on constate que la lignée L10 maintient une teneur en eau élevée, quel que soit "l'environnement" (Figure 5). Cette lignée mérite une attention particulière dans le cadre de

ce programme de sélection, qui vise entre autres à identifier les individus porteurs de gènes de tolérance au stress hydrique.

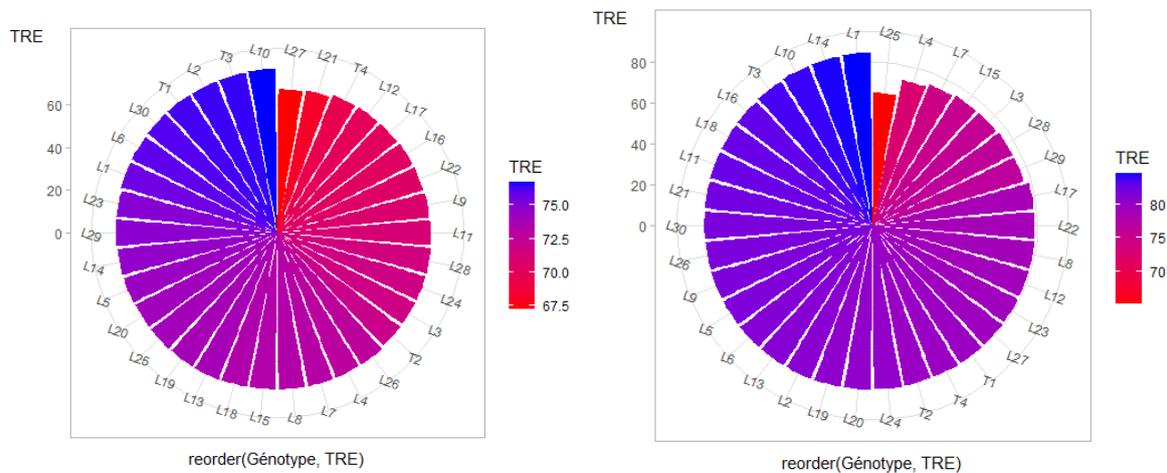


Figure 5 : Variation de la teneur relative en eau chez les génotypes de blé tendre étudiés durant les campagnes agricoles 2020/21 (à gauche) et 2021/22 (à droite).

2.2.3. Intégrité cellulaire

Le taux d'endommagement cellulaire est marqué comme faible chez les lignées L22 (85 %), L11 (86.2 %) et L7 (86.8 %) au cours de la campagne 2020/21. Le taux le plus élevé est exhibé par les lignées L8 (97.1 %), L2 (96%) et L15 (95.9 %), figure 6.

Durant l'année 2021/22, les lignées possédant une haute tolérance vis-à-vis du stress thermique sont le témoin T3 (85.9 %), suivi des lignées L6 (87.4 %) et L13 (89.7 %), alors que celles les plus sensibles sont présentées dans l'ordre suivant : L15 (97.6 %), L7 (98.1%) et L1 (99.2%), figure 6.

L'intégrité cellulaire pourrait être utilisée comme un critère essentiel au cours du processus de sélection, plus particulièrement dans les zones sèches. Les lignées L13, L10, L23 et, dans une moindre mesure, L24 figurent parmi les génotypes à faible interaction "génotype * année agricole" avec une meilleure tolérance au stress causé par les hautes températures, figure 6.

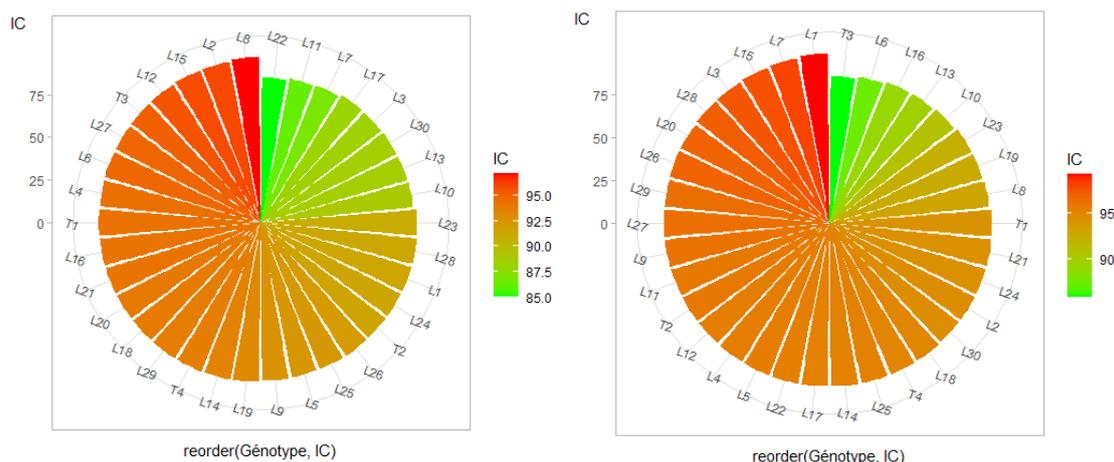


Figure 6 : Variation de l'intégrité cellulaire chez les génotypes de blé tendre étudiés durant les campagnes agricoles 2020/21 (à gauche) et 2021/22 (à droite).

2.2.4. Température du couvert végétal

Au cours de l'année 2020/21, les températures les plus basses du couvert végétal ont été enregistrées dans l'ordre croissant chez L18 (25.9°C), L28 (26.1°C) et L26 (26.2°C) ; les températures les plus élevées ont été observées chez les lignées L3 (29.5°C), L27 (29.9°C) et L1 (30.2°C), figure 7. De même, en 2021/22, les valeurs de ce caractère ont été faibles chez L22 (30.7°C), L14 (31.7°C), L16 (31.7°C) et L20 (31.7°C), mais élevées chez les lignées L8 (34°C), L5 (34°C), et L21 (34°C), figure 7.

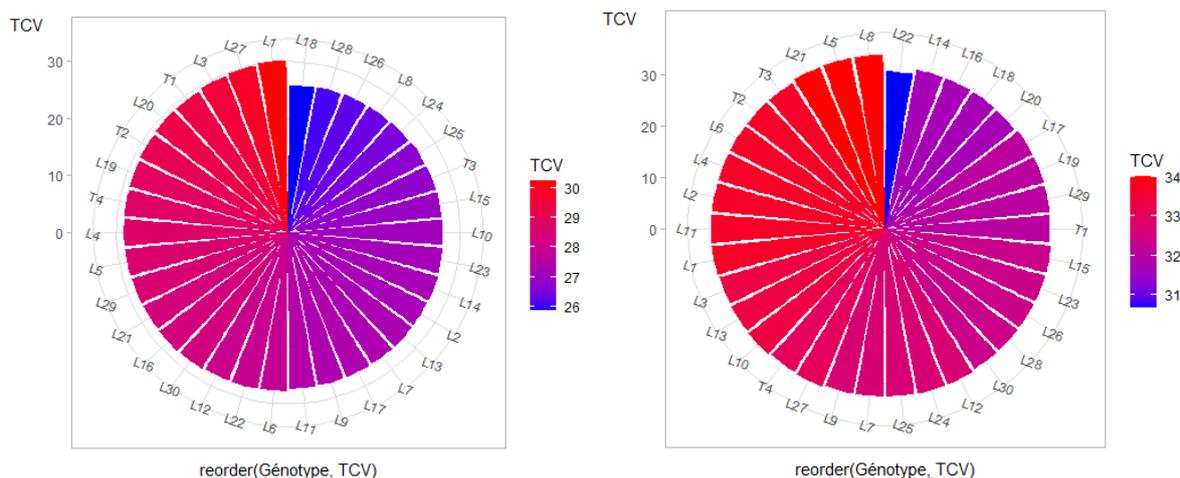


Figure 7 : Variation de la température du couvert végétal chez les génotypes de blé tendre étudiés durant les campagnes agricoles 2020/21 (à gauche) et 2021/22 (à droite).

2.2.5. Teneur en chlorophylle

Durant la campagne 2020/21, les valeurs moyennes de la teneur en chlorophylle sont respectivement de 41.5 Spad pour la lignée L6 et de 49.8 Spad pour le témoin T4 (Figure 8).

Lors de la deuxième campagne 2021/22, les teneurs en chlorophylle sont un peu plus élevées par rapport à la première campagne, variant de 42.8 Spad (moyenne minimale observée chez L15) à 56.3 Spad (moyenne maximale notée chez L29), figure 8.

En raison de la forte interaction "génotype * année agricole", l'ordre de classement des génotypes varie largement selon la campagne agricole. Néanmoins, certains génotypes comme le témoin T4 ainsi que les lignées L6 et L17 n'ont pas exprimé de réponse différentielle en fonction de l'année agricole dans laquelle ils ont été évalués (Figure 8). En effet, malgré les variations climatiques, le témoin T4 maintient une meilleure teneur en chlorophylle dans les feuilles.

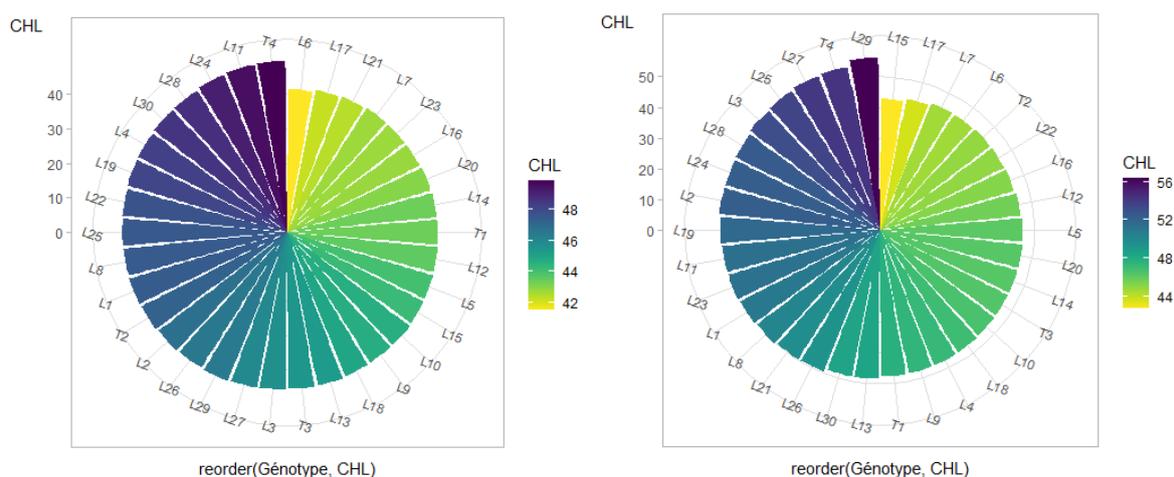


Figure 8 : Variation de la teneur en chlorophylle chez les génotypes de blé tendre étudiés durant les campagnes agricoles 2020/21 (à gauche) et 2021/22 (à droite).

2.2.6. Surface foliaire de la feuille étendard

Au cours de l'année 2020/21, les lignées L25 (9.8 cm²), L26 (10.1 cm²) et L11 (10.3cm²) présentaient, les surfaces foliaires les plus réduites (Figure 8). Inversement les lignées L17 (15.3 cm²), L22 (15.1 cm²) et le témoin T2 (13.9 cm²), possédaient les feuilles étendards les plus larges parmi le matériel végétal évalué (Figure 9).

Lors de la deuxième campagne, la lignée L22 (26.9 cm²) ainsi que le témoin T1 (25.5 cm²) affichaient des surfaces foliaires maximales par rapport aux autres génotypes. D'autre part, la lignée L4 (11.5 cm²) et le témoin T3 (12.5 cm²) produisaient des feuilles à surfaces plus réduites.

D'après la figure 8, on observe une plus grande variabilité inter-génotype pour ce caractère lors de la deuxième campagne que pendant la première. Les lignées L4 et L11 se distinguent par des surfaces foliaires réduites, tandis que la lignée L22 se caractérise par des feuilles larges, quel que soit l'année climatique (Figure 9).

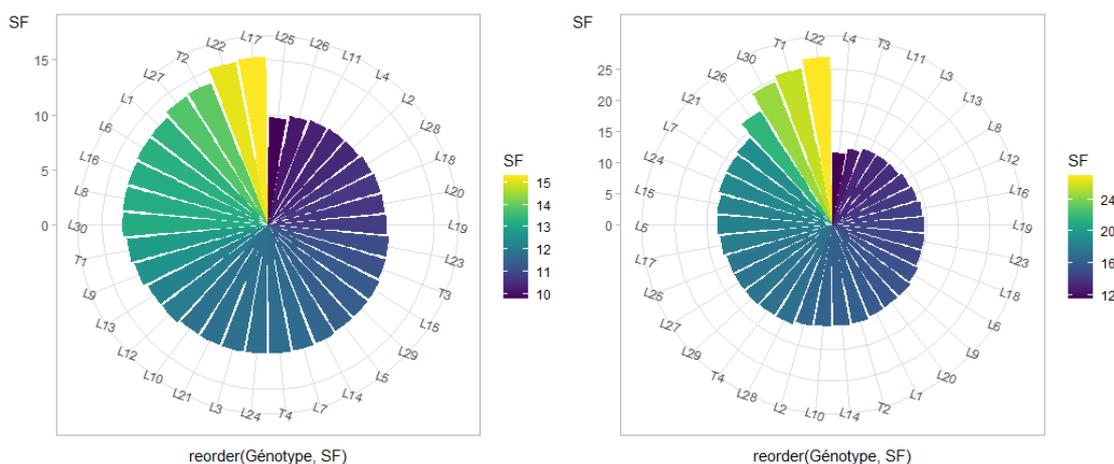


Figure 9: Variation de la surface foliaire de la feuille étandard chez les génotypes de blé tendre étudiés durant les campagnes agricoles 2020/21 (à gauche) et 2021/22 (à droite).

2.2.7. Hauteur de la végétation

Lors de la campagne agricole 2020/21, les valeurs moyennes de la hauteur de plantes sont significativement plus importantes chez la lignée L10 (52.7 cm) suivie de L15 (49.70 cm) et L22 (49.3 cm). La lignée la plus courte est L30 avec 38.7 cm (Figure 10).

Durant la campagne 2021/22, les hauteurs observées sont plus élevées en comparaison avec la campagne précédente. Les hauteurs maximales sont constatées chez les lignées L22 (109.7 cm), L15 (107.3 cm), L20 (105.7 cm) et L12 (104 cm) ; tandis que les hauteurs minimales sont notées chez les témoins T3 et T1 (81.7 et 82.7 cm respectivement) ainsi que chez la lignée L11 (83 cm).

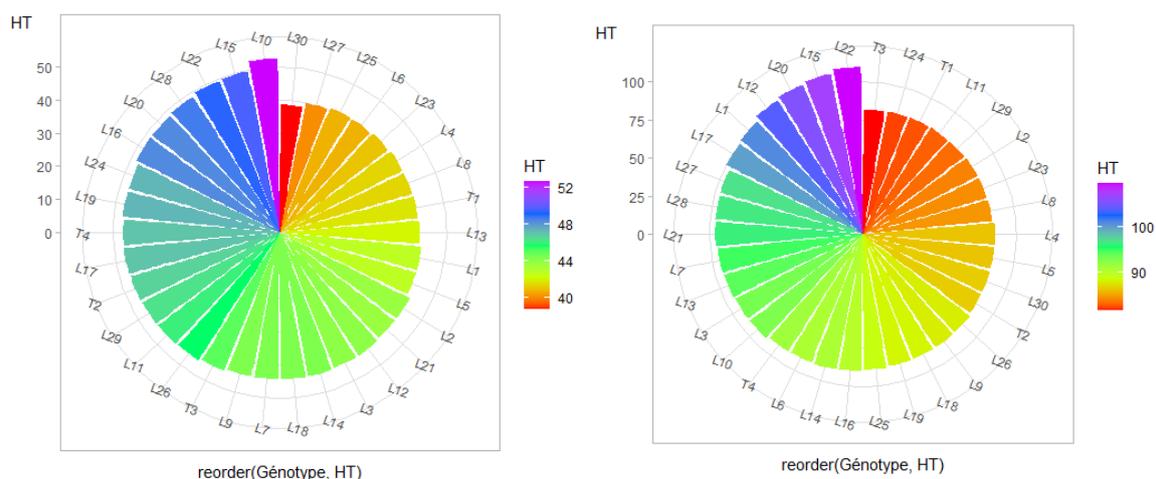


Figure 10 : Variation de la hauteur de la végétation chez les génotypes de blé tendre étudiés durant les campagnes agricoles 2020/21 (à gauche) et 2021/22 (à droite).

2.2.8. Nombre d'épis/m²

Le nombre d'épis le plus élevé est marqué chez la lignée L1 (371.7 épis/m²) suivie du témoin T3 (215.0 épis/m²) (Figure 11). D'autre part, le nombre le plus faible en épis/m² est marqué chez le témoin T4 (123.3 épis/m²). En deuxième campagne, le nombre d'épis le plus important est matérialisé par L30 (124.7 épis/m²) suivie de L20 (119 épis/m²) et L6 (117.3 épis/m²) ; celles ayant un nombre d'épis très faibles sont par ordre décroissant le témoin T1 (79.7 épis/m²) et les lignées L22(72) et L16 (66.7 épis/m²) (Figure 11).

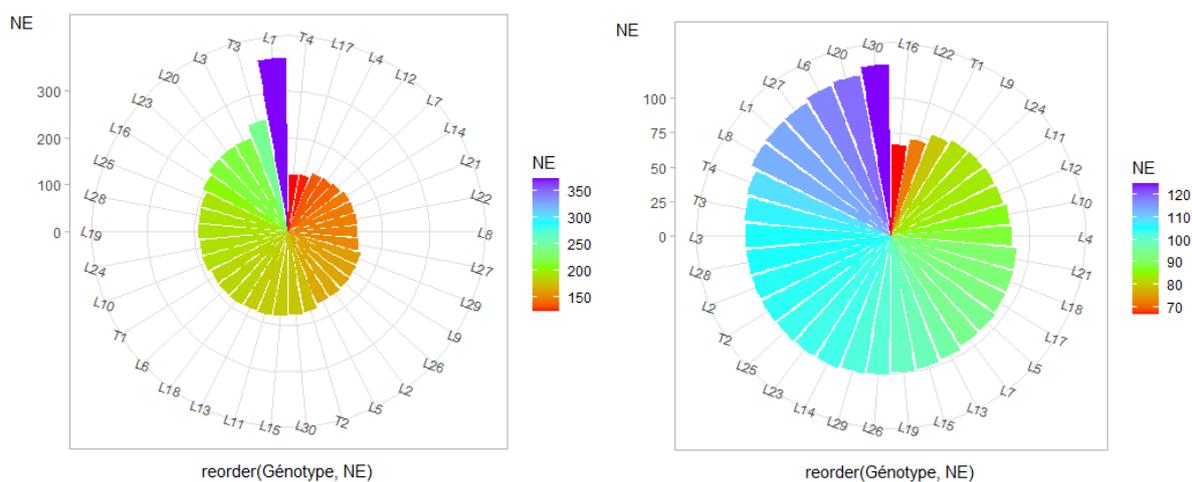


Figure 11: Variation du nombre d'épis/m² chez les génotypes de blé tendre étudiés durant les campagnes agricoles 2020/21 (à gauche) et 2021/22 (à droite).

2.2.9. Poids des épis

Les résultats obtenus au cours de la campagne 2020/21 indiquent que les lignées L1 et L20 ont produit les plus hauts rendements, avec des moyennes respectives de 308.3 et 145 quintaux par hectare (q/ ha), générant ainsi les poids d'épis les plus élevés (Figure 12). A l'opposé, Les lignées L7 (53.3 q/ ha) et L4 (56.7 q/ ha), ainsi que le témoin T4 (58.3 q/ ha) ont affiché les plus faibles valeurs pour ce caractère.

Lors de la deuxième campagne, la lignée L6 (154 q/ ha) suivie des deux témoins T2 (152 q/ ha) et T4 (152 q/ ha) présenté les rendements maximaux. En revanche, les poids des épis les plus faibles ont été observés chez les lignées L15 (119.0 q/ ha) et L5 (119.7 q/ ha), figure 12.

Les poids des épis enregistrés chez le matériel végétal évalué au cours de la campagne agricole 2021/22 sont supérieurs à ceux de la campagne 2020/21. La lignée L1 et, dans une moindre mesure, le témoin T2 ont maintenu leurs performances concernant ce caractère au cours des deux campagnes d'étude.

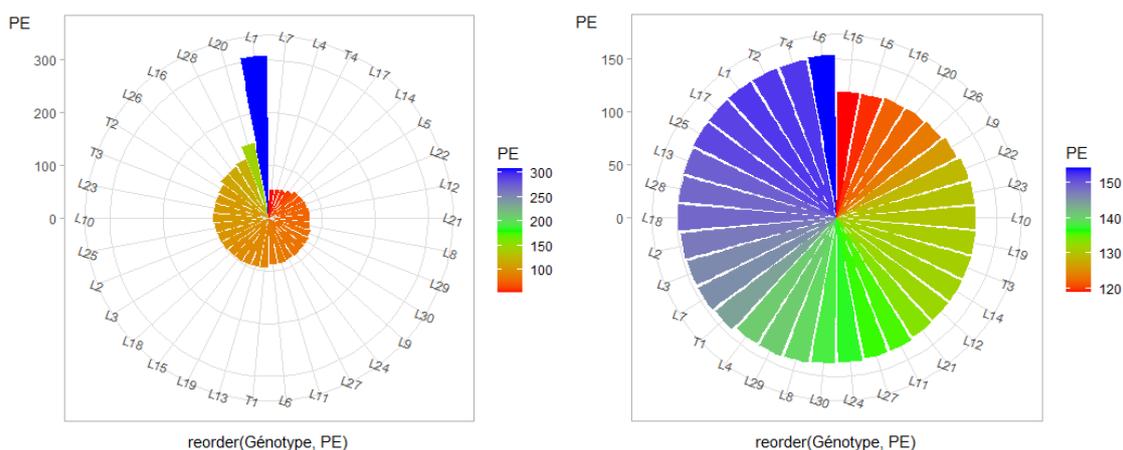


Figure 12 : Variation du poids des épis chez les génotypes de blé tendre étudiés durant les campagnes agricoles 2020/21 (à gauche) et 2021/22 (à droite).

2.2.10. Poids de mille grains

En 2020/21, l'analyse des résultats du poids de mille grains montre que les lignées L21 (33.33 g) et L1 (33.33 g) suivies par le témoin T4 (31.7 g) affichent les valeurs moyennes les plus élevées, comme illustré à la figure 12. Les lignées L15, L22 et L5, ainsi que le témoin T2, produisent, en revanche, les valeurs de poids de mille grains (PMG) les plus faibles (20.0 g).

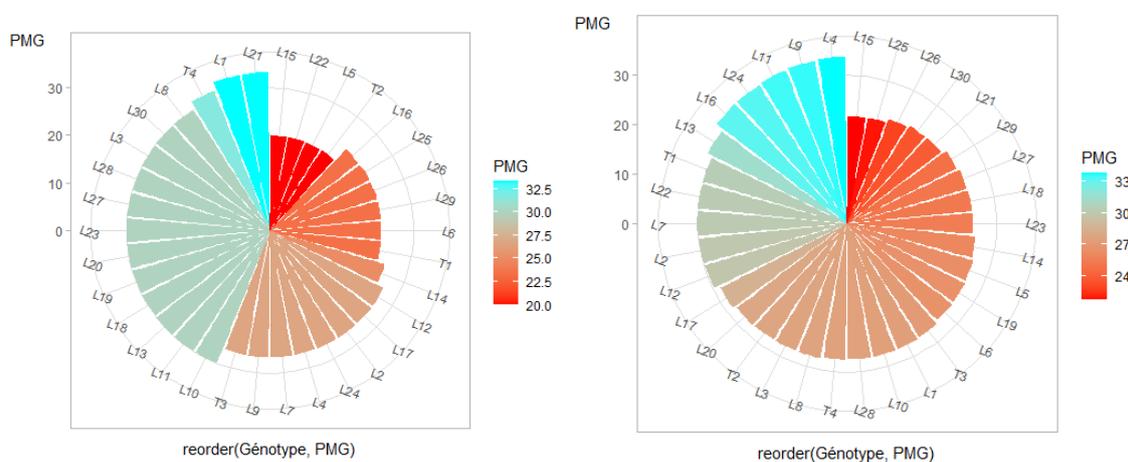


Figure 13: Variation du poids de mille grains chez les génotypes de blé tendre étudiés durant les campagnes agricoles 2020/21 (à gauche) et 2021/22 (à droite).

Lors de la deuxième campagne, cinq lignées sur trente-quatre, à savoir L4, L9, L11, L24 et L16, expriment les meilleurs PMG avec respectivement 33.7 g, 33.5 g, 33.4 g, 33.2 g et 33.1 g. Cependant, les lignées L15 et L25 présentent les PMG les plus faibles, avec respectivement 21.7 g

et 21.9 g. Les valeurs de PMG sont presque similaires entre les deux campagnes, d'où une différence statistiquement non significative.

2.2.11. Rendement en grains

Au cours de la campagne 2020/2021, les lignées les plus performantes en termes de rendement sont par ordre décroissant, L1, L20 et L28 avec des moyennes respectives de 120 q/ha, 88.33 q/ha et 70 q/ha (Figure 13). Les plus faibles rendements sont observés chez les lignées L7, L4 et L5 avec des moyennes de 25 q/ha, 26.7 q/ha et 30 q/ha, respectivement (Figure 14).

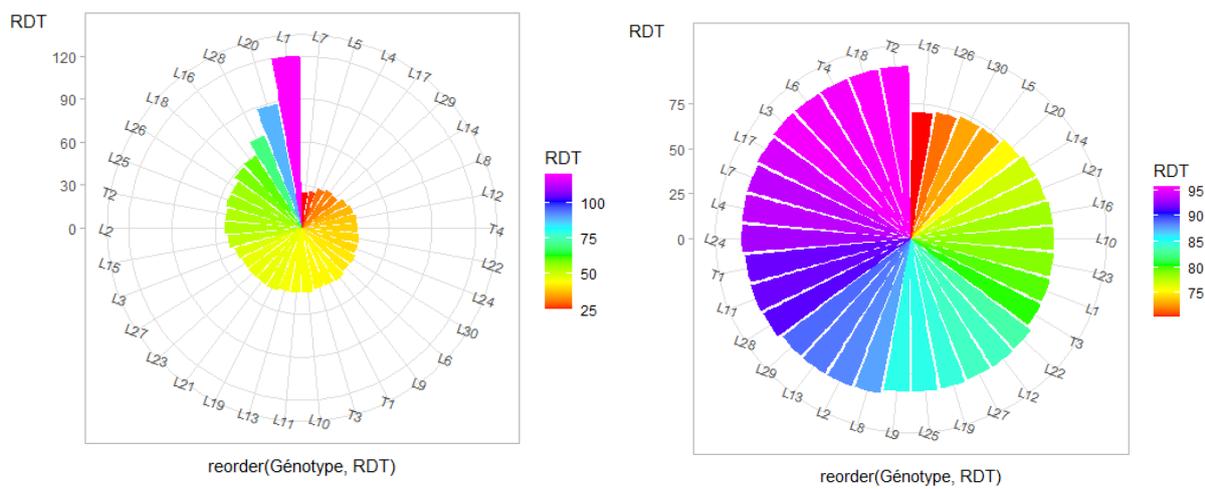


Figure 14 : Variation du rendement en grains chez les génotypes de blé tendre étudiés durant les campagnes agricoles 2020/21 (à gauche) et 2021/22 (à droite).

Lors de la deuxième campagne 2021/22, les génotypes les plus productifs sont les deux témoins T2 (95.7 q/ha) et T4 (95.33 q/ha), ainsi que les lignées L18 et L6 avec des moyennes de rendement de 95.7 q/ha et 95.3 q/ha, respectivement (Figure 14). Nos résultats montrent qu'à l'exception de la lignée L18, aucun génotype (lignée ou témoin) n'a présenté de très bonnes performances de rendement en grains lors des deux campagnes, ce qui suggère que la campagne agricole a fortement influencé l'expression de ces génotypes pour ce caractère. L'étude des valeurs moyennes des caractères morpho-physiologiques et agronomiques des deux campagnes 2020/21 et 2021/22 a permis de mettre en évidence l'effet direct de l'année agricole sur la performance des génotypes de blé tendre. Ainsi, aucun génotype n'a présenté les meilleures valeurs pour l'ensemble des traits évalués. Les lignées évaluées ont alors présenté des comportements totalement différents selon les caractères étudiés.

La présence de l'interaction "génotype * année agricole" a été largement rapportée dans la littérature. Kara (2015) et Saleh *et al.* (2020) ont constaté, dans leurs recherches sur blé, une

variation génotypique importante en fonction de la localisation et de l'année. Dans le même contexte, Kirouani et *al.* (2023), dans une étude basée sur la discrimination d'un germoplasme de blé dur évalué sous des conditions pluviométriques peu favorables, ont conclu que l'effet de la campagne a fortement influencé l'expression des caractères agronomiques mesurés.

3. Composantes de la variation

L'étude des facteurs héréditaires et non héréditaires influençant la variabilité totale facilite la procédure de sélection, en fournissant des détails significatifs et spécifiques sur la population évaluée.

Les estimations des paramètres génétiques et non-génétiques de la variation, issues de l'analyse combinée des caractères phéno-morpho-physiologiques évalués sont présentées dans le tableau 6.

Tableau 6: Paramètres génétiques et non-génétiques estimés pour les caractères étudiés durant les deux campagnes d'expérience.

Caractère	Paramètre					
	σ^2_G	σ^2_E	σ^2_{G*E}	CV_G (%)	CV_G/CV_E	h^2_{sl} (%)
DPV	0.40	1.25	3.02	0.52	0.56	18.74
TRE	1.10	0.00 [#]	32.21	1.38	0.19	19.08
IC	0.00 [#]	28.26	1.28	0.00	0.00	0.00
TCV	0.11	3.22	0.00	1.10	0.19	19.85
CHL	4.81	5.50	2.45	4.65	0.94	69.21
SF	1.65	12.64	1.29	8.91	0.36	37.45
HT	8.36	25.43	17.31	4.25	0.57	39.34
NE	142.77	2501.37	81.28	8.62	0.24	23.78
PE	49.42	904.19	595.37	6.00	0.23	9.93
PMG	0.46	21.53	5.35	2.47	0.15	6.82
RDT	0.00 [#]	306.36	117.09	0.00	0.00	0.00

DPV: Durée de la phase végétative, TRE: Teneur relative en eau, IC: Intégrité cellulaire, TCV: Température du couvert végétal, CHL: Teneur en chlorophylle, SF: surface foliaire, HT: Hauteur de la végétation, NE: Nombre d'épis, PE: Poids d'épis, PMG: Poids de mille grains, RDT: Rendement en grains. σ^2_G : Variance génotypique, σ^2_E : Variance environnementale, σ^2_{G*E} : Variance de l'interaction 'génotype *environnement', CV_G : Coefficient de variation génotypique, h^2_{sl} : Héritabilité au sens large. [#]Les variances négatives sont rapportées à 0.

Le coefficient de variation génotypique variait de 0.00%, valeur minimale obtenue pour l'intégrité cellulaire et le rendement en grains, à 8.91%, valeur maximale trouvée pour la surface foliaire. Les estimations des coefficients de variation génotypique et phénotypique ont été classées comme étant faibles (0-10%), modérés (10-20%) et élevées (>20%), comme l'indiquent Sivasubramanian et Menon (1973). L'ensemble des caractères morpho-physiologiques intégrées dans cette étude affichent des valeurs faibles, ce qui explique la faible variabilité génétique exploitable et le potentiel de sélection limité. Ces résultats concordent avec les conclusions d'Ahmad et *al.* (2023) qui rapportent l'absence des valeurs élevées pour le tous les caractères étudiés chez dix génotypes de blé tendre, ainsi que celles de Mekaoussi et *al.* (2021), qui ont signalé

une variabilité génotypique relativement faible parmi les caractéristiques physiologiques évaluées au sein d'une collection de blé dur sous des conditions semi-arides sud méditerranéennes, comme la teneur relative en eau, la teneur en chlorophylle de la feuille drapeau, la température du couvert végétal et l'intégrité cellulaire. Ces auteurs ont démontré des coefficients de variation environnementale élevés et ont expliqué leurs résultats par le manque de précision et/ ou les effets environnementaux sur l'expression des caractères mesurés. Inversement aux résultats de cette étude, des travaux antérieurs menés dans le cadre d'évaluation la variabilité génétique suggèrent de grandes variations d'ordre génotypique et phénotypique pour le poids de mille grains (Ali *et al.*, 2008 ; Adhiena *et al.*, 2016) et le rendement en grain (Mecha *et al.*, 2016 ; Meles *et al.*, 2017). De nombreux travaux dans la littérature rapportent des valeurs faibles et proches à nos conclusions pour le coefficient de variation génotypique concernant la hauteur des plants de blé (Yadav *et al.*, 2021 ; Geneti *et al.*, 2022).

Les valeurs du ratio CV_G/CV_E sont inférieures à l'unité pour tous les caractères étudiés suggérant la forte sensibilité de ces caractères à l'environnement de production.

Selon Regmi *et al.* (2021), les coefficients de variation phénotypique et génotypique indiquent seulement la quantité de variabilité totale disponible dans un caractère évalué et ne la divisent pas en fractions héréditaires (variance génotypique) et non héréditaires (variance environnementale). Ainsi, le coefficient de détermination génotypique ou héritabilité est largement utilisé pour séparer les composantes génétiques et environnementales de cette variation phénotypique. Dans ce contexte, les sélectionneurs essaient de minimiser l'influence de l'environnement autant que possible pour identifier les gènes d'intérêt pour leur performance sur les traits agronomiques. De plus, les estimations de l'héritabilité ont un rôle à jouer dans la détermination de l'efficacité de la sélection d'un tel trait. L'héritabilité au sens large était auparavant classée par Robinson *et al.* (1949) comme faible (0-30%), modérée (30-60%) et élevée (>60%). Les valeurs prises par ce paramètre estimées dans la présente étude sont élevées pour la teneur en chlorophylle (69.21%), modérée pour la surface foliaire (37.44%) et la hauteur de la végétation (39.34%). L'héritabilité est faible pour le reste des attributs, suggérant la forte influence environnementale sur l'expression de ces traits, et la sélection sur la base de ces caractères sera plus délicate (Acquaah, 2012). Nos résultats sont en désaccord avec ceux obtenus par Naik *et al.* (2015), Chekole *et al.* (2016), Jamil *et al.* (2017), Kumar *et al.* (2017) et Ferede *et al.* (2023) qui ont rapportés des valeurs élevées d'héritabilité pour l'ensemble des traits physiologiques et agronomiques de blé tendre.

L'héritabilité en tant que paramètre génétique, aide les sélectionneurs à déterminer le degré de transmission des caractères des ascendants aux descendants, la méthode appliquée ainsi que prédire le gain génétique à la fin de chaque cycle (Tesfaye *et al.*, 2016).

L'héritabilité peut varier selon le caractère mesuré, la population et l'environnement dans lequel cette population est évaluée. Les caractères quantitatifs expriment souvent des valeurs d'héritabilité faibles, ce qui rend le processus de sélection difficile et parfois non pratique. Les caractères faiblement affectés par les facteurs environnementaux possèdent une héritabilité élevée, ce qui permet au sélectionneur d'envisager le processus de sélection dès les premières générations lors du criblage des populations en ségrégation pour isoler des sujets élites (Falconer et Mackay, 2009).

Le progrès de la sélection dans une population donnée peut alors prospérer à travers l'estimation en héritabilité, le pourcentage de variation génétique existant, l'intensité de sélection ainsi la durée consacrée (Mekuria *et al.*, 2018 ; Upasna *et al.*, 2019). Le tableau 7 illustre les variations en coefficient de variation, variance génotypique et l'héritabilité au sens large exprimées par les caractères étudiés au cours des deux campagnes d'expérience.

Tableau 7 : Paramètres génétiques et non-génétiques estimés pour les caractères étudiés par environnement.

Caractère	Environnement					
	2020/21			2021/22		
	CV (%)	σ^2_G	$h^2_{sl}(\%)$	CV (%)	σ^2_G	$h^2_{sl}(\%)$
DPV	0.67	2.22	90.33	0.93	4.77	92.04
TRE	4.37	2.80	45.17	7.74	2.03	13.80
IC	2.32	7.63	83.33	5.96	0.00 [#]	0.00
TCV	4.44	0.78	60.64	4.24	0.07	11.04
CHL	5.57	3.56	62.23	3.67	11.39	91.39
SF	9.73	1.48	76.72	21.77	7.86	63.56
HT	10.93	2.36	22.85	5.22	50.34	86.85
NE	28.62	1058.57	54.73	15.29	106.40	58.68
PE	33.21	1436.29	80.76	13.95	0.00 [#]	0.00
PMG	18.61	6.49	43.63	9.98	8.50	76.83
RDT	38.17	202.39	64.66	13.95	16.18	25.52

DPV : Durée de la phase végétative, TRE : Teneur relative en eau, IC : Intégrité cellulaire, TCV : Température du couvert végétal, CHL : Teneur en chlorophylle, SF : surface foliaire, HT : Hauteur de la végétation, NE : Nombre d'épis, PE : Poids d'épis, PMG : Poids de mille grains, RDT : Rendement en grains. CV : Coefficient de variation, σ^2_G : Variance génotypique, h^2_{sl} : Héritabilité au sens large. [#]Les variances négatives sont rapportées à 0.

Au cours de la campagne agricole 2020/21, le coefficient de détermination génotypique est élevé pour les caractères DPV, IC, TCV, CHL, SF, PE et RDT ; moyen pour TRE, NE et PMG ; et faible pour HT. Durant la deuxième campagne 2021/22, l'héritabilité est élevée pour DPV, CHL, SF, HT et PMG ; modérée pour NE ; et faible pour TRE, IC, TCV, PE et RDT. Cette variation inter-environnement concernant le degré de transmission des caractères ciblés par la sélection, où certains caractères se montrent fortement héritable dans un environnement et faiblement héritable dans un autre et vice-vers-ça (cas de IC, TCV, HT, PE et RDT), Ceci complique l'effort du sélectionneur et rend la sélection plus délicate.

4. Corrélations phénotypiques entre les caractères mesurés

La sélection d'un caractère aurait un impact direct sur l'expression d'un autre caractère, facilitant la sélection et l'avancement dans le programme d'amélioration des plantes. Le degré et la direction des relations entre les traits évalués sont mesurés par l'analyse des coefficients de corrélation. Les résultats de l'analyse des corrélations phénotypiques entre les caractères mesurés dans le matériel végétal évalué pendant les campagnes agricoles 2020/21 et 2021/22 sont données dans le tableau 8.

Pendant la campagne 2020/21, la durée de la phase végétative (DPV) est négativement corrélée au poids de mille grains (PMG) avec ($r = -0.390$), Le nombre d'épis (NE) présente des corrélations positives et significatives avec la teneur relative en eau (TRE) ($r = 0.428^*$), le poids des épis (PE) ($r = 0.914^*$) et le rendement en grains (RDT) ($r = 0.801^*$). Ces deux derniers caractères sont significativement corrélés ($r = 0.924^*$). Ces résultats suggèrent qu'un rendement élevé est le résultat d'un nombre élevé d'épis associé à un poids conséquent des épis (soit un poids du grain important) à l'unité de surface, un meilleur statut hydrique de la plante et une durée de cycle courte. Ces résultats sont en accord avec ceux d'Al-Tabbal (2012) et Saroj *et al.* (2021) qui ont décrit l'influence significative du poids des épis dans la matérialisation du rendement de blé.

Au cours de la campagne 2021/22, les résultats indiquent que la durée de la phase végétative (DPV) est négativement liée au poids de mille grains (PMG) ($r = -0.345^*$) mais positivement corrélée à la surface foliaire de la feuille étendard (SF) ($r = 0.363^*$) et la hauteur de la végétation (HT) ($r = -0.376^*$). Cette dernière présente également d'autres corrélations significatives, positive avec l'intégrité cellulaire (IC) ($r = 0.350^*$) et négative avec la teneur en chlorophylle (CHL) ($r = -0.358^*$). En plus de leurs corrélations significatives avec la durée de la phase végétative, la surface foliaire (SE) et le poids de mille grains (PMG) sont négativement liés à la température du couvert végétal (TCV) ($r = -0.450^*$) et le nombre d'épis (NE) ($r = -0.577^*$), respectivement. Le rendement en grain (RDT) est positivement associé au poids des épis (PE) ($r = 0.769^*$) et au poids de mille grains (PMG) ($r = 0.445^*$). Ces résultats suggèrent que les génotypes les plus performants en termes de rendement sont ceux à poids d'épis élevé résultant de gros grains dans les épis et à cycle végétatif court. D'autre part, les génotypes à cycle long présentent une hauteur importante, des feuilles larges avec une teneur en chlorophylle dans les feuilles réduites, ainsi qu'une sensibilité élevée au stress thermique. Les génotypes à feuilles larges semblent assurer une plus forte couverture du sol durant la période végétative, réduisant ainsi la température ambiante et l'évaporation de l'eau du sol.

La corrélation négative entre le poids de mille grains (PMG) et le nombre d'épis (NE) peut s'expliquer par le phénomène de compensation mutuelle entre les différentes composantes du rendement (Slafer *et al.*, 2014). En effet, la diminution du nombre d'épis/ m² peut provoquer une

compensation partielle via une augmentation du poids du grain, ce qui peut être suffisant pour maintenir un rendement stable. Selon Dejonckheere (2023), le génotype à faible tallage compense le faible nombre d'épi/plante par un poids de l'épi élevé.

Ribot et *al.* (2017), dans une étude menée sur l'évaluation du rendement de blé dans les régions arides de Chili, ont noté la présence de fortes associations entre le rendement et le reste des caractères étudiés sous un régime pluviométrique moins favorable. En revanche, un nombre restreint de caractères présentent des liaisons significatives avec le rendement sous conditions irriguées.

Tableau 8 : Coefficients de corrélations phénotypiques entre caractères durant les campagnes agricoles 2020/21 (en dessus de la diagonale) et 2021/22 (en dessous de la diagonale).

Variabes	DPV	TRE	IC	TCV	CHL	SF	HP	NE	PE	PMG	RDT
DPV	1	0.082	0.136	0.186	-0.101	0.052	0.108	-0.052	-0.093	-0.390*	-0.153
TRE	-0.065	1	0.077	-0.127	-0.075	-0.270	-0.151	0.428*	0.285	-0.116	0.129
IC	0.153	-0.320	1	0.018	-0.167	-0.219	-0.197	-0.035	0.018	-0.056	0.079
TCV	-0.263	0.072	-0.160	1	-0.02	0.334	-0.174	0.243	0.295	0.097	0.245
CHL	-0.031	-0.207	0.193	0.157	1	-0.194	0.053	0.070	0.096	0.175	0.104
SF	0.363*	-0.037	0.267	-0.450*	-0.09	1	-0.026	-0.059	0.021	-0.151	-0.069
HP	0.376*	-0.098	0.350*	-0.326	-0.358*	0.185	1	-0.027	0.023	-0.153	0.115
NE	0.023	-0.032	0.072	0.274	0.290	-0.115	-0.02	1	0.914*	0.255	0.801*
PE	-0.028	-0.257	0.041	0.253	0.275	-0.096	-0.135	0.302	1	0.269	0.924*
PMG	-0.345*	0.156	-0.121	0.064	-0.142	-0.241	-0.134	-0.577*	0.043	1	0.325
RDT	-0.29	-0.267	0.004	0.141	0.198	-0.233	-0.236	-0.099	0.769*	0.445*	1

Légende : *DPV* : Durée de la phase végétative, *TRE* : Teneur relative en eau, *IC* : Intégrité cellulaire, *TCV* : Température du couvert végétal, *CHL* : Teneur en chlorophylle, *SF* : surface foliaire, *HP* : Hauteur de la plante, *NE* : Nombre d'épis, *PE* : Poids d'épis, *PMG* : Poids de mille grains, *RDT* : rendement grain. Les valeurs en gras indiquent des corrélations significatives au seuil de 5%.

Conclusion

L'intérêt de cette étude est d'analyser la variabilité génétique au sein d'une population composée de trente lignées avancées de blé tendre et de quatre témoins d'origine diverse. Cette analyse porte sur divers caractères phénologiques, physiologiques et morpho-agronomiques.

Les résultats montrent la présence de différences génotypiques très hautement significatives pour la plupart des caractères étudiés, à l'exception de la teneur relative en eau (TRE), l'intégrité cellulaire (IC) et la température du couvert végétal (TCV).

L'effet de "année" s'est révélé très hautement significatif sur l'expression de la majorité des caractères, à l'exception du poids de mille grains (PMG). La quasi-totalité des caractères présentent également une interaction significative à très hautement significative entre le génotype et l'environnement, à l'exception de la TRE et de la TCV. Cela suggère que la variation du milieu a une forte influence qui réduit la capacité des génotypes à exprimer pleinement leur potentiel.

Ces résultats sont corroborés par le ratio CV_G/CV_E (coefficient de variation génétique / coefficient de variation environnementale), qui prend des valeurs inférieures à 1 pour l'ensemble des variables et par les faibles estimations de l'héritabilité au sens large (à l'exception du CHL), calculées à partir de l'analyse combinée des effets génotypiques et environnementaux. Cela complique la prédiction du potentiel génétique des génotypes étudiés et le processus de sélection des individus les plus performants et les mieux adaptés à la variation du milieu.

L'analyse des corrélations phénotypiques indique que les génotypes à cycle végétatif long présentent des caractéristiques telles qu'une hauteur importante, des feuilles larges avec une teneur en chlorophylle réduite, ainsi qu'une sensibilité accrue au stress thermique. Le rendement en grains est étroitement lié au nombre d'épis, au poids des épis et au poids de mille grains, toutes campagnes incluses. Ce résultat suggère que les génotypes qui présentent un poids d'épis élevé, résultant de gros grains dans les épis, et un cycle végétatif court, peuvent être sélectionnés pour leur performance de rendement.

Parmi les lignées évaluées, les génotypes L1, L20, L28 et L18 se sont démarqués (effet moyen année) par un rendement en grains supérieur à celui du meilleur témoin. Cette performance est associée à un nombre d'épis élevé, un poids d'épis important, un cycle végétatif court à intermédiaire, ainsi qu'une hauteur de plante moyenne. Ces lignées représentent ainsi un matériel prometteur pour les programmes de sélection visant à accroître la productivité en conditions semi-arides.

CHAPITRE 02

***Caractérisation précoce de la tolérance
du blé tendre au stress hydrique induit par le
polyéthylène glycol (PEG-6000)***

CHAPITRE 02 : Caractérisation précoce de la tolérance du blé tendre au stress hydrique induit par le polyéthylène glycol (PEG-6000)

Résumé

En Algérie, la sécheresse est le principal obstacle à l'amélioration de la productivité du blé. La tolérance au stress hydrique causé par la sécheresse est une caractéristique très complexe et l'une des clés importantes de la stabilité du rendement. A travers ce travail, nous avons essayé d'évaluer les effets du stress hydrique induit par le polyéthylène glycol 6000 (PEG-6000) sur les composantes de la germination et les caractéristiques de croissance chez 34 génotypes de blé tendre. Deux niveaux de stress hydrique (5 et 15 % de PEG-6000) ont été appliqués et comparés au traitement témoin (0% de PEG-6000). Les données relatives aux différents attributs ont été enregistrées, notamment le pourcentage final de germination (PFG), le temps moyen de germination (TMG), le coefficient de vélocité de germination (CVG), l'indice de germination (IG), la germination moyenne journalière (GMJ), le nombre de racines (NR), la longueur des racines (LR), la longueur de la première feuille (LF), les poids des matières fraîches racinaire (MFR) et aérienne (MFA). Sous le stress 15% de PEG-6000, les résultats ont montré une forte variabilité entre les génotypes. Le temps moyen de germination (TMG) et le nombre de racines (NR) ont montré une tendance à la hausse, tandis que les autres caractères ont été marqués par une tendance à la baisse dans l'ensemble des génotypes testés. L'analyse des moyennes par génotype montre que sous le stress 15% de PEG-6000, comparé au témoin (0 % de PEG-6000), les valeurs moyennes de PFG, CVG, IG, GMJ, LR, LF, MFR et MFA ont été réduites respectivement, de -4.06, -31.20, -38.79, -4.06, -43.82, -14.83, -50.90 et -27.08 %. En revanche, les valeurs moyennes de TMG et NR ont été augmentées de 46.11 et 8.03%. Il ressort de cette étude que les attributs étudiés, hormis le NR, peuvent être utilisés comme traits de sélection pour distinguer les génotypes de blé tolérants et ceux sensibles à la sécheresse dans une grande population. La tolérance et la sensibilité au stress hydrique des génotypes étudiés ont également été indiquées par les valeurs les plus élevées et les plus faibles de l'indice de tolérance au stress (STI). La méthode de classement de la somme des rangs et le graphique en 3 dimensions de Fernandez catégorisaient "L21", "L28", "L13" et "L16" comme des sources précieuses de tolérance au stress hydrique précoce. Par conséquent, ces lignées peuvent être utilisées dans les programmes de sélection pour améliorer la tolérance du blé à la sécheresse.

Mots clés : Germination, Croissance, Indice de tolérance au stress, Somme moyenne des rangs.

Introduction

Les céréales pluviales occupent une grande partie de la superficie agricole située dans les hautes plaines semi-arides et fournissent l'essentiel de la production nationale. La diversification et la complémentarité entre les cultures, notamment céréalières et l'élevage constituent la base de l'organisation des exploitations agricoles (Benniou, 2022). Cela produit à l'échelle du territoire et des systèmes de production une diversité de demandes en termes d'espèces, de variétés et de leur capacité d'adaptation au système et à l'environnement de production.

Le blé tendre (*Triticum aestivum* L.) est l'une des principales espèces céréalières cultivées en Algérie. Il est cultivé sur 612.300 hectares dans les régions du nord du pays, principalement en zones subhumides et semi-arides, selon un système biennal dominant jachère-céréale (Fellahi *et al.* 2019). La sécheresse est signalée comme étant le facteur le plus limitatif de la production de blé dans ces régions. En plus du climat variable selon les saisons et de la fragilité des sols avec un contenu calcaire élevé et une fertilité en baisse en raison de décennies d'agriculture minière (Lahmar et Ruellan, 2007), la production actuelle reste très insuffisante pour couvrir les besoins de consommation en constante augmentation. Il est à noter que les céréales et leurs dérivés constituent la base de l'alimentation des algériens, avec plus de 70 % de l'apport calorique et 70 à 80 % de l'apport protéique de la ration nationale. Face à cette contrainte, le pays a recourt chaque année à l'importation de grandes quantités de blé, représentant une facture élevée <https://www.world-grain.com/articles/16704-focus-on-algeria>.

L'un des objectifs les plus importants des politiques agricoles était essentiellement à booster la production nationale de céréales et à accroître la production de blé. Dans ce contexte, l'élargissement des terres cultivées a été une approche privilégiée. De nombreuses études ont en effet démontré l'intérêt de l'irrigation supplémentaire pour corriger le déficit hydrique et la possibilité d'améliorer les rendements (Merrouche *et al.*, 2014 ; Aissaoui et Fenni, 2020 ; Bellague *et al.*, 2023).

L'un des approches est sans doute la façon la plus efficace de lutter contre le stress hydrique. Cependant, la disponibilité des ressources en eau là où le blé est cultivé, est de plus en plus limitée. Ainsi, l'augmentation du rendement en grain dans les conditions pluviales se fait plutôt par la sélection et l'optimisation des pratiques agronomiques. Mais selon Benniou (2008), l'élaboration des rendements en céréales en Algérie, ne se base pas sur des facteurs de performance, mais plutôt sur des déterminants de fonctionnement des exploitations agricoles.

Le stress hydrique causé par la sécheresse affecte les plantes de blé à tous les stades du développement, plus particulièrement les phases de croissance critiques (levée, un cm d'épi, épiaison, anthèse). Ces dernières sont considérées comme étant les plus sensibles à cette contrainte

environnementale. Il est démontré dans la littérature que ces phases de croissance pourraient être utilisées comme critères de sélection pour la tolérance à la sécheresse dans les programmes de sélection (Sharma *et al.* 2022). L'installation du stress hydrique aux stades précoces des cultures peut réduire le pourcentage de germination, retarder le développement et donc la vigueur des plantes (Kizilgeci *et al.* 2017 ; Fellahi *et al.* 2022).

Le recours à la sélection de variétés tolérantes à la sécheresse est une approche primordiale pour minimiser la réduction du rendement et maintenir la production agricole dans un environnement stressant (Mohammadi *et al.*, 2018 ; Fellahi *et al.* 2020 ; Hannachi et Fellahi, 2023). La première étape dans un programme de sélection consiste à évaluer le matériel végétal disponible pour identifier les génotypes parentaux tolérants qui pourront ensuite être croisés pour générer du matériel de ségrégation utile (Benbelkacem, 2022). Plusieurs approches ont été rapportées dans la littérature pour le criblage du matériel végétal vis à vis de la tolérance aux stress abiotiques pendant l'installation de la culture, notamment le taux de germination, la longueur et le nombre de racines et de pousses, la longueur du coléoptile, la teneur relative en eau, l'accumulation de chlorophylle, de proline et de sucres solubles dans les jeunes feuilles (Baloch *et al.* 2012 ; Jain *et al.*, 2013 ; Boudiar *et al.*, 2019 ; Fellahi *et al.*, 2019 ; Altaf *et al.*, 2021 ; Sharma *et al.*, 2022).

La sélection pour la tolérance à la sécheresse se fait de façon routinière au stade juvénile à l'aide d'un stress hydrique simulé par des molécules chimiques telles que le polyéthylène glycol 6000 (PEG6000). En raison de son poids moléculaire élevé, cette substance est largement utilisée dans les études de criblage *in vitro* pour évaluer la réponse au stress hydrique chez diverses cultures comme le blé tendre (*Triticum aestivum* L.), le blé dur (*Triticum durum* Desf.), l'orge (*Hordeum vulgare* L.) et le maïs (*Zea mays* L.). Le PEG-6000 inhibe la germination et la croissance en réduisant la capacité de la plante à absorber l'eau, induisant ainsi un déficit hydrique artificiel (Djemel *et al.*, 2018).

Dans cette étude, nous avons évalué la réponse de 34 lignées avancées de blé tendre (*Triticum aestivum* L.) soumises au stress hydrique induit par le PEG-6000 aux stades germination et de jeune plantule.

Matériels et méthodes

1. Matériel végétal et conditions expérimentales

L'étude a été réalisée à l'Institut National de la Recherche Agronomique d'Algérie (INRAA), Unité de recherche de Sétif au cours de l'année 2022. Le matériel végétal utilisé est celui décrit au chapitre 1.

Afin d'évaluer l'impact du stress hydrique sur le comportement de ces génotypes aux stades de croissance précoces, un stress artificiel a été simulé en utilisant le polyéthylène glycol (PEG-6000). Deux expérimentations ont été réalisées : la première a concerné un essai de germination, tandis que la deuxième a été consacrée aux paramètres de croissance des jeunes plantules.

1.1. Essai de germination

Cent graines uniformes et saines de chaque génotype ont été mises à germer dans des boîtes de Pétri (90*15 mm) contenant trois couches de papier-filtre Whatman (type 1). Les graines ont d'abord été désinfectées pendant 5 minutes dans une solution d'hypochlorite de sodium à 5% puis rincées à l'eau distillée et imbibées avec 10 ml de solution de PEG-6000 préalablement préparée. Outre, le traitement témoin (0% PEG-6000) où l'eau distillée a été utilisée, trois concentrations de PEG-6000 (0, 5 et 15 %) ont été appliquées pour induire un stress osmotique, comme suggéré par Sharma et *al.* (2022). Les boîtes de Pétri ont ensuite été incubées pendant sept jours dans l'obscurité, à 22°C et 85 % d'humidité relative (Photo 4). L'essai expérimental a été organisé dans un plan factoriel (génotype x stress) avec trois répétitions.

Les graines germées ont été comptées quotidiennement pendant toute la durée de l'expérience. Une graine a été considérée comme germée lorsque la radicule atteignait environ 2 mm de longueur. Plusieurs indices de germination ont ensuite été calculés, comme mentionné dans le tableau 1, pour permettre l'interprétation des résultats (Photo 4).

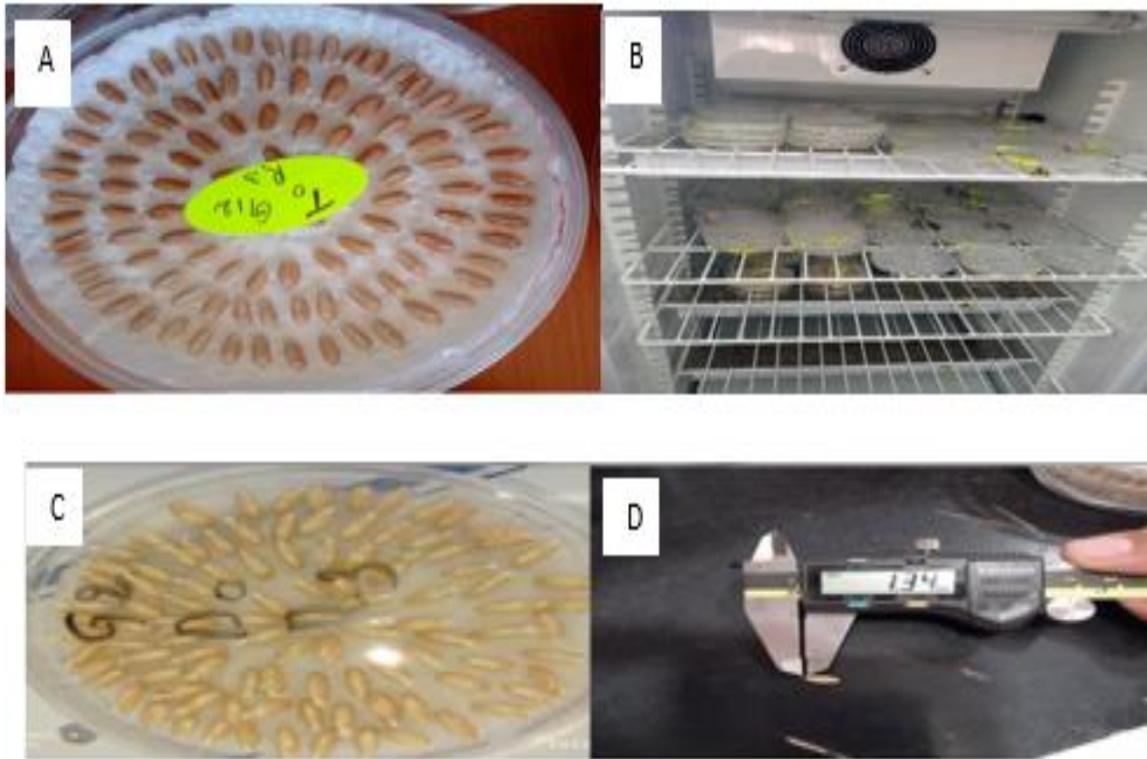


Photo 4 : mise en place des essais : (A), graines de blé dans les boîtes de Pétri, (B) : étuve, (C) et (D) : dénombrement des graines germées.

Tableau 9 : Indice de germination calculée pour les 34 génotypes de blé tendre étudié

Indices de germination	Expression mathématiques	Références
Pourcentage final de germination	$PFG(\%) = \frac{\sum_{i=1}^k n_i}{N} \times 100$	ISTA (2008)
Temps moyen de germination	$TMG (jours) = \frac{\sum_{i=1}^k n_i t_i}{\sum_{i=1}^k n_i}$	Ellis et Roberts (1981)
Coefficient de vitesse de germination	$CVG(\%) = \frac{\sum_{i=1}^k n_i}{\sum_{i=1}^k n_i t_i} \times 100$	Jones et Sanders (1987)
Indice de germination	$IG (jours) = \sum_{i=1}^k n_i / t_i$	AOSA et SCST (1993)
Germination moyenne journalière	$GMJ(\%) = \frac{PFG}{T_n}$	Adams and Farrish (1992)

Légende : n_i : nombre de graines germées dans un i temps, t_i : temps nécessaire pour que les graines germent à l' $i^{\text{ème}}$ compte, N : nombre totale de graines incubées, T_n : nombre totale d'intervalles requis pour la germination finale. **PFG** : Pourcentage finale de germination, **TMG** : Temps moyen de germination. **CVG** : coefficient de vitesse de germination, **IG** : indice de germination, **GMJ** : germination moyenne journalière....

- Le temps moyen de germination (TMG) donne une indication sur le taux et la rapidité de germination. Un TMG plus faible indique que la population de graines germe plus rapidement (Ellis et Roberts, 1981).
- Le coefficient de vitesse de germination (CVG) est une mesure de la rapidité de germination. Il augmente lorsque le nombre de graines germées augmente et le temps nécessaire à la germination diminue (Jones et Sanders, 1987).
- L'indice de germination (IG) est une estimation du temps en jours nécessaires pour qu'un certain pourcentage de graines germent (AOSA et SCST, 1993).
- La germination moyenne journalière (GMJ) correspond au nombre de graines qui germent quotidiennement par rapport au nombre maximum de graines germées. Des valeurs de GMJ plus élevées reflètent une germination plus élevée et plus rapide (Adams et Farrish, 1992).

1.2. Essai de comportement des jeunes plantules

Cette étude porte sur la réponse aux stress hydrique de 34 géotypes de blé tendre cultivés en milieu hydroponique. Les paramètres morphologiques évalués sont : le nombre de racines (NR), la longueur des racines (LR), la longueur de la première feuille (LF), la matière fraîche racinaire (MFR) et la matière fraîche aérienne (MFA). Le PEG-6000 a été utilisé aux mêmes concentrations que le test de germination (0, 5 et 15%).

Dans une chambre de culture automatisée, 50 graines par géotype ont été germées dans des boîtes de Pétri sur papier filtre Whatman inhibé d'eau distillée. Après 48 heures, les graines germées ont été transférées dans des tubes à essai contenant 25 ml de solution de PEG-6000, avec une graine germée par tube et par traitement (Photo 5). Des tampons éponges ont été utilisés pour supporter les graines germées. L'expérience a été mise en place selon un dispositif factoriel (géotype et stress) avec trois répétitions.

L'expérience a duré 10 jours après la transplantation. Au dixième jour, les jeunes plantules ont été extraites des tubes à essai et les différents paramètres de croissance ont été mesurés (Photo 5).

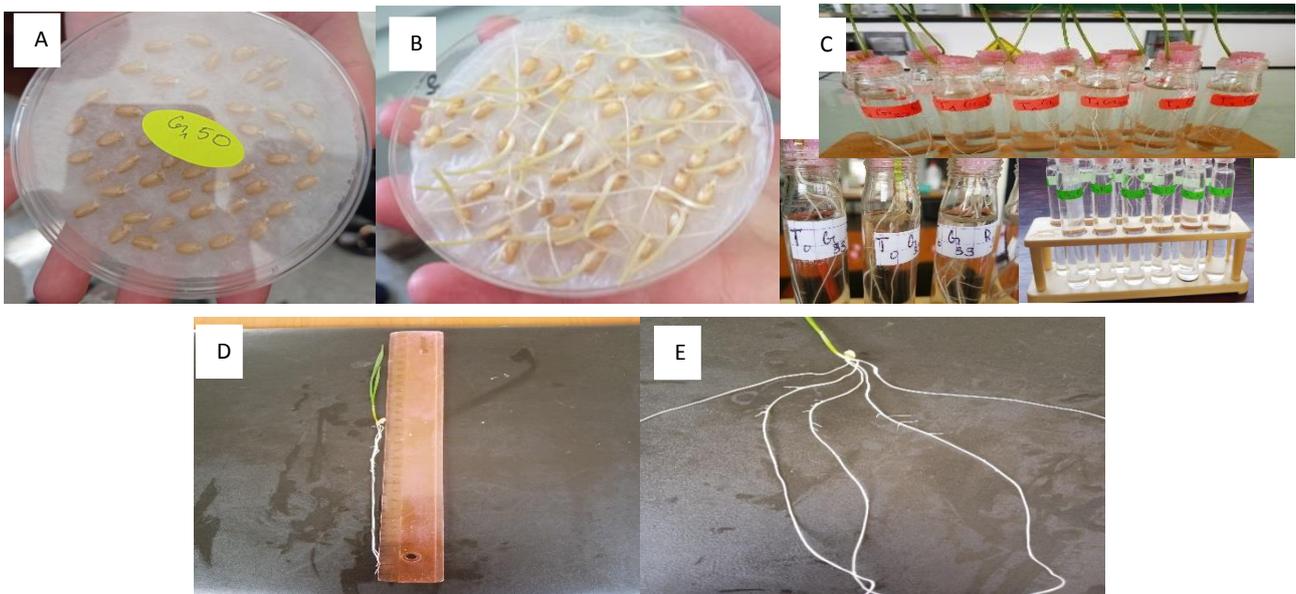


Photo 5 : Transplantation des grains germés et étude des paramètres de croissance. Mise en place de l'essai : (A), graines germées : (B), transplantation de graines germées dans les tubes : (C), mesure de la longueur de la racine principale et de la première feuille : (D), dénombrement de racines : (E).

2. Mesures et notations

Les mesures et notations ont porté sur :

- Nombre de racines (NR, en nombre) : il a été déterminé à la fin de l'expérience pour chaque génotype et traitement par le comptage des racines séminales.
- Longueur des racines (LR, en cm) : la longueur maximale des racines séminales, c'est-à-dire la longueur de la racine la plus longue, a été mesurée à l'aide d'une règle graduée en centimètre.
- Longueur de la première feuille (LF, en cm) : la longueur de la première feuille a été mesurée depuis la graine jusqu'à l'extrémité de la feuille à l'aide d'une règle graduée.
- Poids de la matière fraîche racinaire et aérienne : le poids frais des racines (MFR, en mg) et des feuilles (MFA, en mg) a été déterminé à la fin de l'expérience à l'aide d'une balance de précision.

3. Analyse des données

Les résultats obtenus à partir de ces deux essais ont fait l'objet d'une analyse statistique à deux facteurs (génotypes et stress) selon un dispositif expérimental factoriel complètement randomisé avec trois répétitions. Une analyse de la variance (ANOVA) a été réalisée, suivie d'une comparaison des moyennes des différents traitements sur la base du calcul de la plus petite différence significative au seuil de 5 % ($P_{pds5\%}$).

En outre, nous avons classé les génotypes les mieux tolérants au stress à la dose 15 % de PEG-6000 par rapport au témoin et ce pour chaque caractère mesuré. Selon cette méthode, le meilleur

classement de chaque trait correspond à la valeur la plus faible. De plus, nous avons utilisé la méthode de la moyenne de la somme des rangs (MSR), basée sur le classement antérieur, pour identifier les géotypes les plus tolérants au stress hydrique, suivant la procédure décrite par Aboughadareh *et al.* (2020). Le poids frais global (PFG) et tous les caractères de croissance ont été utilisés à cet effet. Ainsi, sur la base de cette approche, les géotypes ayant les valeurs d'ASR les plus faibles ont été sélectionnés comme géotypes tolérants. En outre, l'indice de tolérance au stress (STI) a été calculé selon Fernandez (1992) en utilisant la biomasse fraîche totale [BFT (mg) = MFR (mg) + MFA (mg)] comme variable au lieu du rendement pour lequel la formule suivante a été initialement développée :

$$STI = \frac{Y_s \times Y_p}{(\bar{Y}_p)^2}$$

Où :

Y_p : BFT dans les conditions non stressées

Y_s : BFT sous stress.

$(\bar{Y}_p)^2$: moyenne de BFT pour tous les géotypes évalués en conditions favorables.

Toutes les analyses statistiques ont été effectuées à l'aide du logiciel R (version 2020).

Résultats et discussion

Les analyses de la variance des paramètres de germination et croissance ont révélé des différences très hautement significatives entre les géotypes pour la plupart des caractères étudiés, à l'exception du nombre de racines (Tableau 10). Concernant la deuxième source de variation le "stress", le test F indique un effet très hautement significatif sur l'ensemble des caractères mesurés (Tableau 10). L'interaction "Géotype * Stress" montre des différences allant de significatives à très hautement significatives pour la majorité des variables, à l'exception du nombre (NR) et la longueur des racines (LR) et du poids de la matière fraîche aérienne (MFA), tableau 10.

La variation due à l'effet "stress" explique la quasi-totalité de la variation totale observée pour tous les caractères mesurés, représentant respectivement 77.34%, 75.73%, 95.94%, 86.77%, 96.36% et 91.64% de la variation totale pour le PFG, NR, LR, LF, MFR MFA, comme indiqué par la somme des carrés de l'ANOVA. D'autre part, l'effet "géotype" associé à l'interaction "Géotype * Stress" contribue à 19.31%, 16.83%, 3.45%, 11.18%, 3.15%, et 7.09% de cette variation pour les mêmes traits, dans le même ordre

Tableau 10 : Carrés moyens de l'analyse de variance des variables étudiées.

Traits	Source de variation			
	Génotypes ddl=33	Stress ddl=2	Génotypes * Stress ddl=66	Erreur ddl=204
PFG	54.13***	341.07***	31.01***	14.77
TMG	0.29***	17.96***	0.08***	0.01
CVG	142.11***	7937.65***	34.37***	5.38
IG	525.74***	13522.23***	47.94***	9.00
GMG	1.10***	6.96***	0.63***	0.30
NR	0.44 ^{ns}	3.87***	0.42 ^{ns}	0.38
LR	41.98***	1515.90***	12.52 ^{ns}	9.71
LF	20.32***	212.35***	7.05*	5.01
MFR	876.97***	44180.80***	565.88***	224.79
MFA	1123.06***	17919.09***	262.89 ^{ns}	248.04

PFG : pourcentage final de germination (%), TMG : Temps moyen de germination (jours), CVG : Coefficient de vélocité de germination (%), IG : indice de germination (jour), GMG : germination moyenne journalière (%), NR : nombre de racines, LR : longueur de racine (cm), LF : longueur de la première feuille (cm), MFR : matière fraîche racinaire (mg), MFA : matière fraîche aérienne (mg). ns, * et ** : différences non significatives et significatives au seuil de 5 % et 1 % de probabilité, respectivement.

1. Effet du génotype

Les valeurs moyennes, maximales et minimales de l'effet du facteur "Génotype" sont indiquées dans le tableau 11.

1.1. Essai de germination

Dans l'ensemble, le pourcentage final de germination varie de 85.67%, (valeur minimale obtenue chez le génotype "L11") à 95.56% (valeur maximale observée chez les lignées "L6" et "L7"). Les lignées "L19" et "L7" présentent respectivement les valeurs moyennes les plus élevées et la plus faible pour le temps moyen de germination, soit 2.5 jours et 1.81 jours. De même, les valeurs du coefficient de vélocité de germination varient de 40.50% chez le génotype "L9" à 56.57% chez "L7". Pour l'indice de germination, la valeur la plus élevée (60.55 jours) a été enregistrée chez "L7", tandis que "L18" a exprimé l'indice de germination le plus faible (40.50 jours). Pour la moyenne journalière de germination, les valeurs moyennes oscillent entre 12.24%, (valeur minimale observée chez le génotype "L11" et 13.65% valeur maximale notée chez "L7").

D'après les résultats, on peut déduire que parmi les génotypes étudiés, la lignée "L7" a présenté des valeurs élevées pour la plupart des caractères liés à la germination, à l'exception du temps moyen de germination où elle a enregistré le temps le plus court, suggérant une vitesse de germination plus rapide.

1.2. Essais de croissance

Les résultats de l'essai de croissance révèlent que le nombre moyen de racines le plus élevé (5.11 racines) a été noté chez les 2 variétés témoin Mawna "T1" et Hidhab "T2", suivies par les lignées

"L24", "L25" et "L26". Inversement, le nombre moyen de racines le plus faible (4.33) a été enregistré chez le génotype témoin Acsad₁₁₃₅ "T4". La racine la plus longue (18.17 cm) appartient au génotype "L21", tandis la plus courte (9.87 cm) est observée chez "L1". De même, la feuille la plus longue (16.06 cm) appartient à la lignée "L28" alors que la plus courte (10.02 cm) se trouve chez "L10", soit un écart de 6,04 cm. Pour le poids frais des racines, la moyenne de l'essai est de 61.79 mg, avec un maximum de 91,49 mg chez "L21" et un minimum de 42.44 mg chez "L1". Pour la matière fraîche aérienne, la moyenne est de 73.78 mg, avec un maximum de 98.93 mg chez le génotype "L28", et un minimum de 54,59 mg chez "L7".

Les coefficients de variation sont très faibles pour les traits de germination et moyens pour les traits de croissance. Globalement, l'effet "Génotype" indique que les valeurs maximales et minimales observées varient selon le caractère et le génotype considéré. Aucun des génotypes testés ne présente les valeurs maximales pour l'ensemble des caractères. Néanmoins, "L1" exprime des valeurs faibles pour deux caractères mesurés sur cinq, notamment la longueur et le poids frais des racines.

Tableau 11 : Valeurs moyennes, minimales et maximales des variables mesurées chez les lignées étudiées.

Traits	Moyenne	Valeurs max et min	LSD _{0.05}	CV (%)
PFG	91.28	85.67 – 95.56	3.57	4.21
TMG	2.19	1.81 – 2.50	0.09	4.54
CVG	47.38	41.35 – 56.57	2.38	5.38
IG	47.61	40.50 – 60.55	2.78	6.31
GMJ	13.04	12.24 – 13.65	0.51	4.21
NR	4.83	4.33 – 5.11	0.57	12.81
LR	13.70	9.87 – 18.17	2.90	22.76
LF	12.49	10.02 – 16.06	2.08	17.93
MFR	61.79	42.44 – 91.49	32.75	24.26
MFA	73.78	54.59 – 98,93	14.63	21.94

PFG : pourcentage final de germination (%), TMG : Temps moyen de germination (jours), CVG : Coefficient de vélocité de germination (%), IG : indice de germination (jour), GMJ : germination moyenne journalière (%), NR: nombre de racines, LR : longueur de racine (cm), LF: longueur de la première feuille (cm), MFR: matière fraîche racinaire (mg), MFA: matière fraîche aérienne (mg).

2. Effet moyen du stress

Les moyennes génotypiques des paramètres mesurés lors des deux essais (germination et croissance) sont illustrées dans la figure 15. Pour le traitement témoin (0% PEG-6000), les valeurs les plus élevées sont respectivement de 93.16% pour le taux final de germination 56.13% pour le coefficient de vélocité de germination, 59.40 jours pour l'indice de germination, 13.31% pour la germination moyenne journalière, 16.59 cm pour la longueur des racines et 81.45 mg pour le poids frais des racines par plant.

A l'inverse, les valeurs les plus faibles de ces mêmes caractères ont été enregistré pour le traitement 15% PEG-6000, soit 89.38% / 38.62%, 36.36, 12.77% / 9.32 cm et 39.99 mg.

Concernant le temps moyen de germination et le nombre de racines, les valeurs les plus élevées (2.63 jours, 4.98 racines) ont été observées sous le traitement 15% PEG-6000, tandis que les valeurs les plus faibles (1.80 jours et 4.61 racines) ont été enregistrées sous le traitement contrôlé (0% PEG-6000).

Les valeurs les plus élevées de la longueur de la première feuille (13.74 cm) et de la matière fraîche aérienne (81.08 mg) ont été observées avec le traitement 5% PEG -6000. A l'inverse, les valeurs les plus faibles (10.91 cm et 56.59 mg) de ces deux paramètres ont été notées sous 15% PEG-6000.

Dans l'ensemble, les attributs étudiés ont montré une diminution ou une augmentation significative en réponse au stress appliqué. Cependant, un nombre limité de génotypes ont présenté de meilleure performance sous 5% de déficit hydrique par rapport aux conditions non-stressantes comme indiquent les graphiques et les boîtes à moustaches.

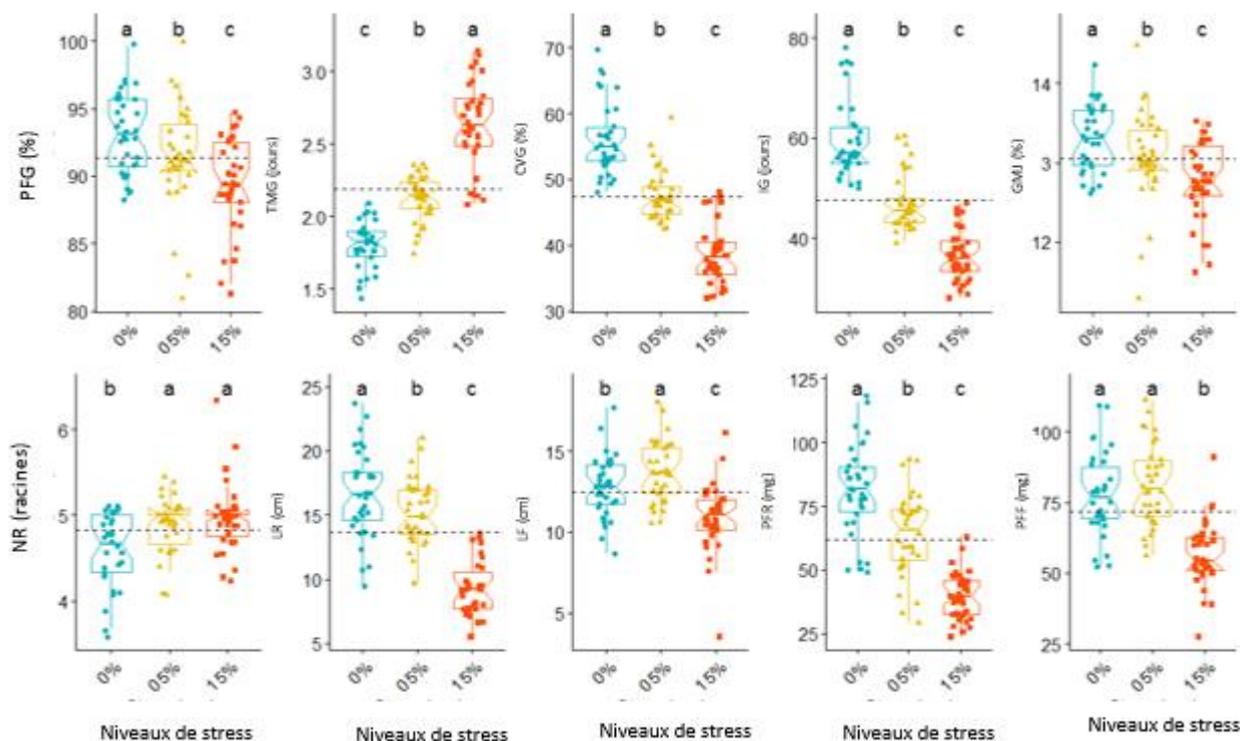


Figure 15 : Effet du stress hydrique induit par le PEG-6000 à différentes doses les variables mesurées chez les 34 génotypes de blé tendre étudiés. Les valeurs suivis de lettres différentes sont statistiquement différentes au seuil de 5% de probabilité. La ligne pointillée correspond à la moyenne du traitement.

3. Effet moyen des interactions "Génotype * Stress"

En ce qui concerne l'interaction "Génotype * Stress", les résultats révèlent que les valeurs des différents caractères ont été considérablement affectées en fonction des concentrations en PEG-6000 employées.

En condition témoin (0% PEG-6000), les lignées "L19", "L9", "L27" et "L21" ont présenté les valeurs les plus élevées respectivement pour le temps moyen de germination. Le coefficient de vélocité de germination, le nombre de racines et le poids frais des racines. A ce niveau de stress, les génotypes "L20", "L18" et "L17" ont enregistré respectivement les moyennes les plus faibles pour le coefficient de vélocité de germination, l'indice de germination et le nombre de racines.

Sous un stress moyen de 5% de PEG-6000, le génotype "L6" a enregistré des valeurs élevées pour le pourcentage final de germination et la germination moyenne journalière. A ce niveau de stress, la lignée "L21" présente également des estimations élevées pour la longueur et le poids frais de la matière fraîche aérienne.

Sous un stress plus sévère de 15% PEG-6000, les lignées "L7" et "L26" affichent respectivement des valeurs élevées pour l'indice de germination et le nombre de racines. En revanche, le génotype "L11" présente la valeur la plus faible pour le pourcentage de germination et la germination moyenne journalière. La lignée avancée "L7" exprime la valeur la plus réduite du temps moyen de germination. Les valeurs les plus faibles de la longueur et du poids frais des racines ont été observées dans "L1", celles de la longueur et du poids de la matière fraîche aérienne ont été observées chez la variété commerciale Rmada "T3". Généralement, les résultats montrent que la réponse des jeunes plants en matière de croissance de l'espèce blé tendre, dépend principalement du génotype testé et du niveau de stress appliqué.

L'analyse des écarts des valeurs prises par les caractères mesurés sous un stress sévère (15% PEG-6000) relativement au témoin (0% PEG-6000) a montré des régressions plus marquées notamment pour le pourcentage final de germination (-4.06%), le coefficient de vélocité de germination (-31.20%), l'indice de germination (-38.79%), la germination moyenne journalière (-4.06%), la longueur des racines (-43.82%), la longueur de la première feuille (-14.83%), le poids frais des racines (-50.90%) et la matière fraîche aérienne (-27.08%), figure 16. En revanche, des écarts positifs sont observés pour le temps moyen de germination (+46,11%) et le nombre de racines (8.03 %), figure 16.

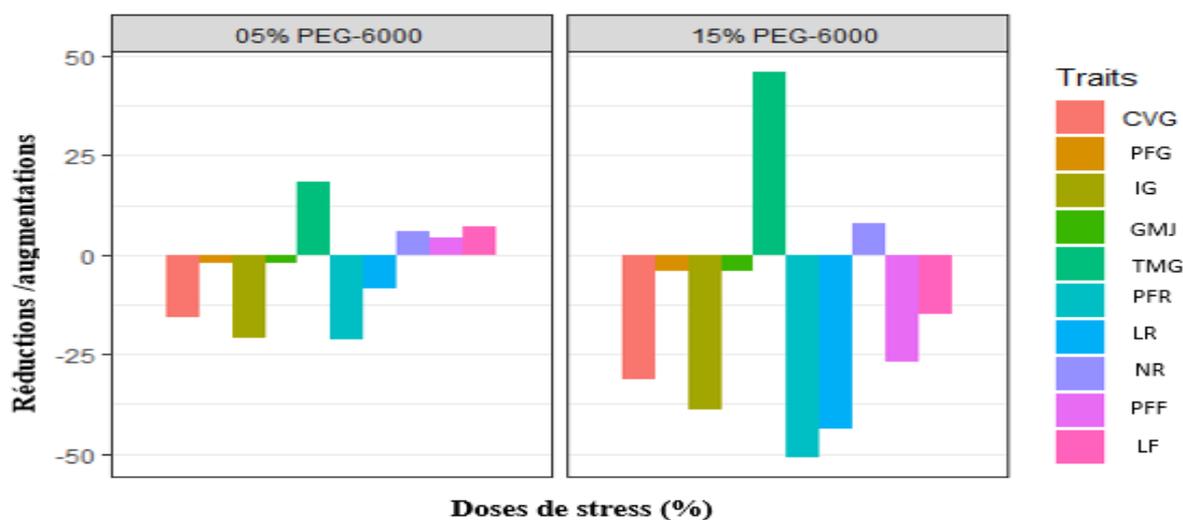


Figure 16 : réduction en %, relativement au témoin T0, des valeurs prises par les variables mesurées chez les lignées de blé étudié.

La réponse physiologique des génotypes à travers les dix paramètres mesurés est considérablement variée, d'une part, par les potentialités génotypiques du génotype lui-même et d'autre part, par les effets interactifs des génotypes et des niveaux de stress causés par l'agent chimique PEG-6000.

Dans l'ensemble, la plus forte diminution du pourcentage final de germination (-5.82%) et de la germination moyenne journalière (-5.82%) a été enregistrée pour le génotype "L5", tandis que le génotype "L11" a exprimé la plus forte augmentation (21.83%) pour chacun de ces deux paramètres, comparé au reste des génotypes.

La lignée "L21" marque une forte diminution (-88.42%) en temps moyen de germination, alors que la plus forte augmentation (12.05%) de ce paramètre a été enregistrée pour le génotype "L3". Inversement, le génotype "L3" affiche la plus forte réduction (-17.07%) concernant le coefficient de vélocité de germination, alors que la plus forte augmentation (46.98%) de ce paramètre a été observée chez "L21". De plus, le génotype "L21" a affiché la plus forte augmentation (55.09%) en indice de germination, et la réduction maximale (-20.84%) de ce caractère a été observée chez "L3". De même, la plus forte baisse (-58.33%) du nombre de racines a été notée pour le génotype "L21", comparée à celle du témoin "T4" qui enregistre un nombre de 14.29%. Ce dernier témoin "T4" montre la plus forte diminution (-30.59%) du poids frais de la première feuille, alors qu'il est à son maximum (63.63 %) chez la variété témoin Rmada "T3" où l'intensité de stress est plus élevée (15% PEG-6000). Ce témoin "T4" a également enregistré la plus forte augmentation des racines (60.66%) et la longueur de la première feuille (72.80%). En revanche, ces deux paramètres sont en baisse (-50.16% et -30.00%) pour les génotypes "L7" et "L4". Par ailleurs, le poids frais des racines

a été en baisse remarquable (-43.70%) chez le génotype "L3", tandis que ce trait présente l'augmentation la plus élevée chez la lignée "L30".

La prédiction de la tolérance ou la sensibilité à la sécheresse du matériel végétal étudié sur la base d'un seul caractère peut prêter à confusion. Afin de distinguer les génotypes tolérants à la sécheresse et les génotypes sensibles, nous avons calculé la moyenne de la somme des rangs (MSR) en utilisant le pourcentage final de germination et tous les caractères liés à la croissance sous traitement sévère de 15% PEG-6000. Au début, tous les génotypes étaient classés pour tous les caractères dans lequel le génotype ayant la valeur la plus élevée est classé le premier. Par conséquent, les génotypes ayant des valeurs faibles ont été considérés comme tolérants au stress hydrique et ceux dont les MSR sont élevées, sont classées en tant que sensibles. Selon cette approche, "L21", "L13", "L16", "T1" et "L17" ayant les valeurs MSR les plus faibles, sont classées comme les meilleurs génotypes de blé tolérants à la sécheresse avec un potentiel osmotique de 15% PEG-6000. En revanche, les lignées "L10", "L11", "L20", "L1" et Rmada "T3", avec des valeurs de la MSR les plus élevées, sont les génotypes les plus sensibles, comme le montre la figure 17.

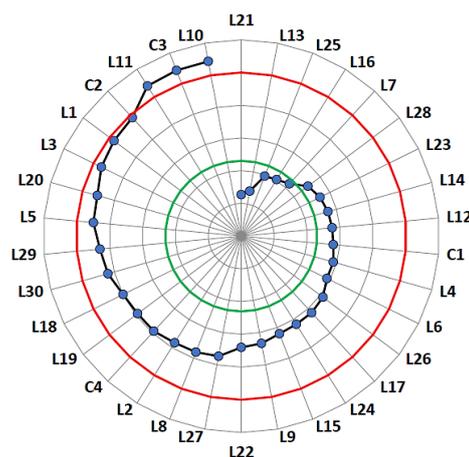


Figure 17 : Valeurs moyennes des rangs des génotypes de blé tendre, calculées sur la base des traits étudiées sous un potentiel osmotique de -15% PEG-6000. Les génotypes dont les valeurs se situent à l'intérieur du cercle vert sont les plus tolérants au stress hydrique, tandis que ceux dont les valeurs se trouvent à l'extérieur du cercle rouge sont les plus sensibles, à une intensité de sélection de 15%.

L'analyse des moyennes de l'essai révèle que le poids de la biomasse fraîche totale chez les 34 génotypes de blé varie de 101.63 mg pour le génotype "L7" à 213.50 mg pour le génotype "L28" dans les conditions environnementales normales (Yp). Alors que la biomasse fraîche totale des génotypes soumis à un environnement stressé de 15% PEG-6000 (Ys) varie de 53.50 mg pour Rmada "T3" à 136.23 mg chez "L21" (tableau 12). En absence de stress, les génotypes "L28", "L21", "L13", "L30" et "L16" ont les meilleures performances, tandis qu'en présence de stress, les

génotypes "L21", "L13", "L28", "L16" et "L4" ont démontré les meilleurs résultats, respectivement. De ce fait, le poids de la biomasse fraîche totale des génotypes de blé étudiés en situation de stress a été réduit de 40%, par rapport aux conditions non stressées, indiquant que les génotypes ont subi un stress modéré.

Tableau 12 : Biomasse fraîche totale des génotypes de blé dans les conditions normales et dans les conditions stressées et leurs indices de tolérance au stress.

Génotypes	Yp	Ys	STI	Génotypes	Yp	Ys	STI
L1	135.40 (29)	62.73 (33)	0.336 (34)	L15	181.63 (7)	97.90 (16)	0.703 (6)
T1	170.63 (10)	104.37 (9)	0.704 (5)	L16	204.57 (5)	116.33 (4)	0.941 (4)
L2	156.57 (19)	101.80 (13)	0.630 (13)	L17	156.37 (20)	96.33 (18)	0.595 (16)
L3	106.23 (32)	93.20 (22)	0.391 (32)	L18	148.10 (22)	88.57 (26)	0.518 (24)
T2	154.33 (21)	93.93 (20)	0.573 (18)	L19	146.17 (23)	101.90 (12)	0.589 (17)
L4	105.13 (33)	109.33 (5)	0.454 (29)	L20	166.40 (13)	79.10 (31)	0.520 (23)
L5	142.53 (27)	85.50 (27)	0.482 (28)	L21	208.87 (2)	136.23 (1)	1.125 (1)
L6	123.27 (30)	105.80 (7)	0.515 (25)	L22	179.5 (8)	97.13 (17)	0.689 (8)
L7	101.63 (34)	99.37 (15)	0.399 (31)	L23	145.93 (24)	104.67 (8)	1.793 (15)
L8	157.30 (18)	89.03 (25)	0.554 (20)	L24	166.30 (14)	92.53 (23)	0.608 (14)
L9	118.30 (31)	108.00 (6)	0.505 (26)	L25	157.47 (17)	102.37 (11)	0.637 (12)
L10	142.63 (26)	71.30 (32)	0.402 (30)	L26	136.20 (28)	93.67 (21)	0.504 (27)
L11	167.03 (12)	82.70 (29)	0.546 (21)	L27	189.03 (6)	91.33 (24)	0.682 (9)
L12	162.60 (16)	100.37 (14)	0.645 (11)	L28	213.50 (1)	130.50 (3)	1.101 (2)
L13	208.63 (3)	131.83 (2)	1.087 (3)	L29	172.20 (9)	83.20 (28)	0.566 (19)
T3	162.80 (15)	53.00 (34)	0.341 (33)	L30	206.60 (4)	81.07 (30)	0.662 (10)
L14	169.77 (11)	103.53 (10)	0.695 (7)	T4	144.43 (25)	94.97 (19)	0.542 (22)

Les témoins sont indiqués en gras, STI : indice de tolérance au stress, Yp : biomasse fraîche totale en absence de stress (mg), Ys : biomasse fraîche totale en présence de stress (mg), les chiffres entre parenthèses indiquent le classement de chaque génotype de blé pour Yp, Ys et IST.

L'indice de tolérance au stress a été estimé pour les 34 génotypes de blé tendre étudiés en utilisant le poids de la biomasse fraîche totale comme indicateur de criblage face au déficit hydrique.

L'indice de tolérance au stress (STI) le plus élevé est exprimé par le génotype "L21", suivi de "L28", "L23", "L13" et "L16". Cela indique que ces génotypes ont subi de faibles réductions en termes d'accumulation de biomasse (BFT) dans un environnement stressé. En revanche, les valeurs les plus faibles de STI ont été obtenues en "L1", le témoin Rmada "T3" et des lignées "L3", "L7" et "L10", montrant que ces génotypes ont connu une très importante réduction de l'accumulation de biomasse fraîche totale (BFT) en présence de stress (Tableau 12, Figure 18). Selon Fernandez (1992), les génotypes ayant un STI supérieur ou égal à 1 sont considérés comme les plus tolérants. Parmi les 34 génotypes de blé étudiés, trois d'entre eux nommés "L21", "L28" et "L13" ont un STI supérieur à 1 ; ces génotypes sont donc considérés comme les plus tolérants au stress hydrique simulé par le PEG-6000 au stade juvénile (Figure 18).

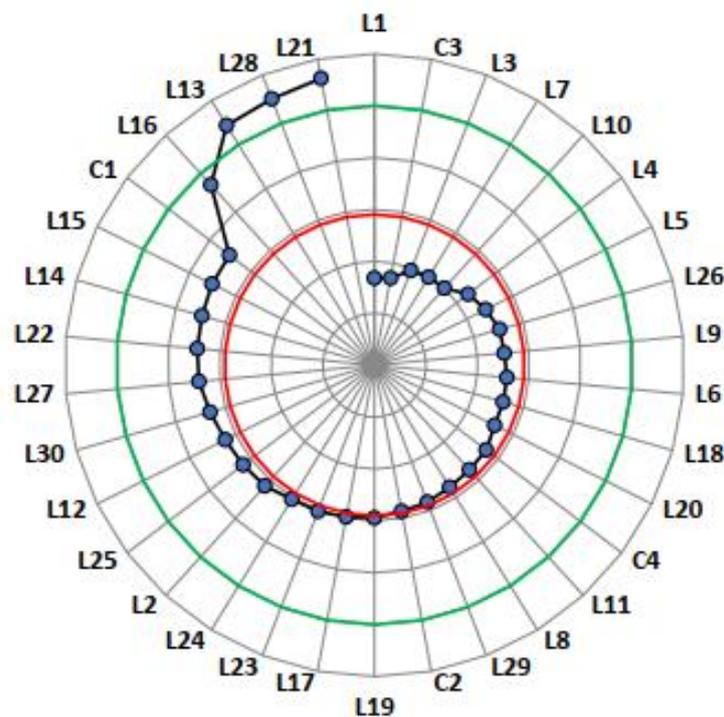


Figure 18 : Indice de tolérance au stress (STI) des génotypes de blé étudiés. Le cercle vert indique des valeurs STI égales à 1, alors que le cercle rouge correspond à la moyenne de STI. Les génotypes se trouvant à l'extérieur de la zone délimitée par le cercle vert sont les plus tolérants au stress. Ceux qui se trouvent à l'intérieur de la zone délimitée par le cercle rouge sont les plus sensibles au stress.

Les résultats de l'analyse de corrélation entre la biomasse produite en absence et en présence de stress sont résumés dans le tableau 13. La corrélation entre la biomasse totale produite en absence de stress (Y_p) et celle produite en présence de stress (Y_s) n'est pas significative (Tableau 13). Ce résultat suggère que la performance génotypique dans des environnements favorables ne conduit pas nécessairement à une amélioration du rendement dans des conditions stressantes. Par exemple, les génotypes "L30", "L16", "L27" et la variété commerciale Rmada "T3" ont produit une biomasse

plus élevée dans des conditions optimales, mais ont surpassés par d'autres génotypes qui ont réussi à accumuler une biomasse plus importante sous stress hydrique (15% PEG-6000).

Ainsi, la sélection de génotypes de blé tolérants au stress hydrique est basée sur les résultats des travaux de Fernandez (1992). Les critères de sélection pourraient identifier des génotypes supérieurs et stables, présentant des corrélations positives et significatives entre le rendement total de biomasse, les conditions non stressé (Yp) et stressées (Ys), et l'indice de tolérance au stress (STI). Ces corrélations indiquent que STI est un critère potentiel pour identifier les génotypes performants de blé dans les deux environnements de croissance.

Tableau 13 : Coefficients de corrélation entre l'indice de tolérance au stress et les biomasses fraîches totales produites en absence (Yp) et en présence (Ys) de stress pour les 34 génotypes de blé étudiés.

Variables	Yp	Ys	STI
Yp		0.0609	0.5079
Ys	0.7321		0.8863^{ns}
STI	0.0022	0.0001	

STI: indice de tolérance au stress, Yp: biomasse fraîche totale dans des conditions non stressée (mg), Ys: biomasse fraîche totale dans des conditions stressées 15% PEG-6000 (mg), les valeurs en gras sont les valeurs significatives au seuil de 5%.

Selon la théorie de Fernandez (1992), les génotypes sont classés en quatre groupes en fonction de leurs performances dans les conditions non stressées et stressées. Les génotypes ayant un haut potentiel dans les deux environnements appartiennent au groupe A ; ceux ayant un potentiel élevé uniquement en absence de stress appartiennent au groupe B ; ceux performants uniquement en conditions de stress sont classés dans le groupe C ; et les génotypes à faible potentiel productif dans les deux conditions constituent le groupe D. Le graphique tridimensionnel de Fernandez montre les liaisons internes entre les valeurs de STI, Yp et Ys afin de distinguer les cultivars du groupe A des autres groupes B, C et D.

Le graphique tridimensionnel montre que "L21" », "L28", "L13" et "L16" appartiennent au groupe A se caractérisant par un rendement en BFT stable dans les deux conditions. Le groupe B comprend "L30" comme lignée d'une excellente performance en conditions normales. Le groupe C contient neuf génotypes dont la variété témoin Mawna "T1" et les lignées "L2", "L4", "L9", "L12", "L14", "L19", "L23" et "L25", qui ont de bonnes performances uniquement en conditions stressées. Le groupe D englobe les génotypes restants, faiblement productifs dans les deux environnements de croissance. Cette classification basée sur l'indice de tolérance au stress (STI) et les performances dans les conditions stressées et non stressées confirme que STI est un bon indicateur pour classer les génotypes de blé tolérants et sensibles. Les résultats obtenus sont donc en accord avec ceux de

l'approche de sélection multi-trait, utilisant la moyenne de la somme des rangs (MSR) comme critère d'évaluation de la tolérance au stress.

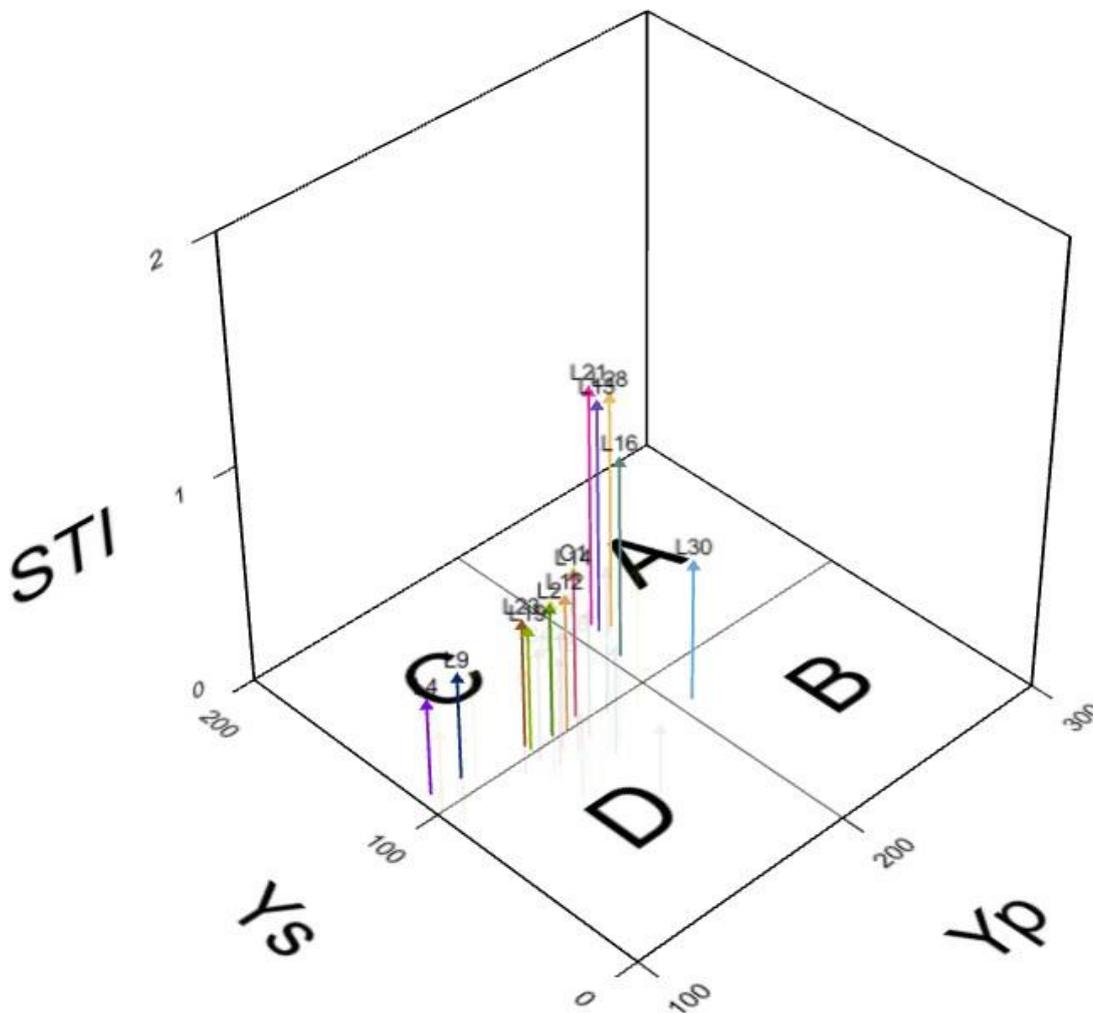


Figure 19 : Répartition des génotypes suivant la classification de Fernandez.

Y_p : matière fraîche totale produite en absence de stress (mg), Y_s : matière fraîche totale produite en présence de stress (mg), STI : indice de tolérance au stress.

Il est bien connu que les premiers stades de développement des plantes, notamment la germination et la croissance des jeunes plantules, sont les plus critiques et les plus sensibles au stress hydrique. Ainsi, la vigueur finale de la plante dépend en grande partie de la performance des graines durant ces stades (Rajabi Dehnavi *et al.*, 2020). L'objectif principal de cette étude était d'identifier les génotypes de blé tolérants et sensibles à la sécheresse durant le stade juvénile, afin d'évaluer leur potentiel face au stress hydrique simulé par le polyéthylène glycol 6000 (PEG-6000).

Selon les résultats, l'impact du PEG-6000 sur la germination des graines et la croissance des plantules varie significativement selon le paramètre évalué, le niveau de stress et le génotype testé. Bien qu'aucun effet négatif du PEG-6000 n'ait été observé, sur les traits TMG, NR, LF et MFA à un niveau de stress relativement faible de 5% PEG-6000 pour les 34 génotypes étudiés, les autres

paramètres de germination et de croissance tels que PFG, IG, GMJ, LR, LF et PFR sont tous affectés. Cependant, le degré de sensibilité au stress augmente avec l'intensité à 15% PEG-6000. Des réductions importantes touchent les composantes de germination telles que PFG, CVG, IG et GMJ ainsi que l'ensemble des paramètres de croissance des jeunes plantules. Le TMG et le NR augmentent avec l'augmentation du niveau de stress, ce qui est cohérent avec la littérature montrant que le manque d'eau altère le pourcentage, la durée et l'uniformité de la germination (Kaydan et Yagmur, 2008).

Le PEG-6000 influence le processus de germination en modifiant l'absorption d'eau par les graines en raison d'un potentiel osmotique réduit dans le milieu, ce qui retarde l'absorption de l'eau, perturbe les réactions métaboliques au niveau cellulaire, réduit la synthèse et la respiration de l'ATP, diminuant ainsi le taux de germination (Jiao *et al.*, 2009 ; Upadhyaya *et al.*, 2021). Ce résultat concernant le pourcentage final de germination s'applique également au coefficient de vélocité de germination, à l'indice de germination et à la germination moyenne journalière, qui montrent des diminutions significatives à partir d'une concentration de 5% PEG. Bien que ces effets dépressifs soient plus marqués à 15% PEG, des études antérieures ont également démontré que l'augmentation des doses de PEG peut affecter ces variables chez diverses cultures telles que le blé tendre, *Triticum aestivum*, (Ghanifathi *et al.*, 2011), *Zea mays* (Shahriari *et al.*, 2014) et *Brassica napus* (Shahverdikandi *et al.*, 2011) et des espèces autochtones comme *Atriplex leuococlada*, *Senna italica*, *Tetraenam andavillei* et *Tephrosia apollinea* (Alam *et al.*, 2020).

Néanmoins, une légère tendance à la hausse du PFG, du CVG, de l'IG et des GMJ est observée dans des conditions de déficit hydrique, ce qui pourrait s'expliquer par l'effet réversible par osmose du PEG-6000 sur les graines incubées, comme l'ont déjà signalé Kaya *et al.*, (2006) et Boudiar *et al.*, (2019).

La réponse des différents génotypes de blé pour le temps moyen de germination est plus ou moins similaire, mais le TMG augmente avec l'augmentation du potentiel osmotique PEG-6000, comme l'ont également observé Singh *et al.* (2016). Sous 5% PEG, aucune diminution du pourcentage de germination n'a été observé pour plus de huit génotypes, tandis que sous 15% PEG, des réductions importantes ont été enregistrées pour plus des deux tiers des génotypes. Le pourcentage de germination semble donc être un critère crucial de sélection pour la tolérance au stress précoce, comme l'ont suggéré Richards (1978) et Almaghrabi (2012). Richards (1978), qui a déclaré que le test de germination pourrait être utile pour le dépistage de la tolérance à la sécheresse. Selon Almaghrabi (2012), des essais germination-levée menés dans un environnement contrôlé dans le cadre d'études en laboratoire semblent convenir pour un mieux sélectionner de grandes populations en vue d'améliorer la tolérance à la sécheresse avant l'analyse du rendement.

Cependant, Sayar *et al.* (2008) et Baloch *et al.*, (2012), ont travaillé sur le blé dur (*Triticum durum*) et le blé tendre (*Triticum aestivum*). Ils ont respectivement souligné que le test de germination ne confirme pas la tolérance des génotypes au stress, mais révèle plutôt les différences de qualité des semences. Tandis que Faisal *et al.*, (2017), ont signalé que les paramètres déterminant la vigueur des jeunes plantes, y compris ceux de la croissance, sont considérés comme des indices pertinents pour la sélection de génotypes de blé tolérants à la sécheresse.

Nos constatations révèlent que l'augmentation progressive du stress causé par le manque d'eau affecte l'ensemble des paramètres étudiés, à l'exception du nombre de racines. Néanmoins, la régression ou la progression des différents paramètres vis-à-vis de leurs réponses à la sécheresse varie en fonction des potentialités génotypiques individuelles, ce qui converge avec les résultats de Sharma *et al.*, (2022) obtenus sur le blé. Mahpara *et al.* (2022), dans une étude similaire, ont signalé une baisse considérable de tous les paramètres liés au développement de la plante. Même si certains génotypes enregistrent une légère diminution, ils sont considérés comme tolérants à la sécheresse. En définitive, l'application des traitements du potentiel osmotique, suggère une grande diversité génétique parmi les génotypes qui peuvent être utilisés pour créer de nouvelles variétés de blé avec une bonne adaptation aux régions semi-arides en Algérie. La diminution de la longueur des racines et de leur poids frais est plus importante que la croissance des pousses, à savoir, la longueur et le poids de la première feuille en fonction du degré d'augmentation du stress par le PEG-6000. Il convient de souligner que les diminutions par rapport au traitement témoin sont de -43.82% en longueur des racines et de -50.90% en poids frais des racines, contre -14.83% en longueur de la première feuille et -27.08% en masse fraîche aérienne. Ceci pourrait être le résultat des effets négatifs du stress hydrique sur la division et l'élongation cellulaires par l'inhibition de l'absorption de nutriments et l'affectation négative de la photosynthèse, nécessaires à l'accumulation de biomasse et par conséquent à l'allongement des pousses et des racines (Gue *et al.*, 2012 ; Sharma *et al.*, 2022). Dhanda *et al.*, (2004) et Ahmed *et al.*, (2022), ont noté que le ratio racines/ pousses est significativement positif en conditions de stress afin d'améliorer l'assimilation d'eau. Cet ajustement est lié aux différentes concentrations d'acide abscissique (ABA) dans les racines et les pousses. Dans notre étude, le pourcentage du nombre total des racines par plante pour les deux niveaux de stress (5 et 15% de PEG) est relativement élevé comparé au témoin. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par les travaux de Boudiar *et al.*, (2019). Cependant, Almaghrabi (2012), confirme que le nombre de racines ne pourrait pas être un critère de sélection pour distinguer les génotypes tolérants et ceux sensibles.

En raison de l'impact négatif de la sécheresse sur les paramètres de germination et de croissance ainsi que ses effets sur les divers génotypes, on souligne que l'ensemble des génotypes de blé tendre

testés sont classés pour chaque paramètre à une concentration de 15% PEG-6000 en termes de sélection à caractères multiples. En conséquence, la meilleure valeur de chaque trait a reçu le rang minimum. Nos résultats démontrent une variation très nette dans la contribution du système de défense sur le plan morpho-physiologique vis-à-vis de la tolérance des génotypes étudiés au stress hydrique. La réponse de la plante au stress par le biais des paramètres morpho-physiologiques aux stades primaires de développement de la plante est rapporté par Baloch *et al.*, (2012).

Le classement moyen des rangs a été calculé pour chaque génotype, dont les génotypes possédant des valeurs de moyenne des sommes des rangs (MSR) les plus faibles qui ont été reconnus comme les plus tolérants au stress. Certaines études antérieures recommandaient l'utilisation de la MSR pour les caractères multiples afin d'identifier les génotypes potentiels pour la tolérance au stress (Benderradji *et al.*, 2016 ; Fellahi *et al.*, 2019 ; Aboughadareh *et al.*, 2020 ; Karuniawan *et al.*, 2021 ; Zafar *et al.*, 2021). A l'aide de cette méthode, la lignée "L21" ayant la plus faible MSR (6.33) constitue le génotype le plus tolérant et la lignée "L10" la plus sensible affiche la valeur de MSR la plus élevée (27.17).

Pour mieux comprendre le comportement des génotypes de blé face au stress hydrique, notre évaluation a porté sur l'indice de tolérance au stress (STI), qui est basé sur la biomasse fraîche totale (BFT) dans les conditions environnementales normales (Yp) et de stress (Ys). Par conséquent, l'analyse du STI a classé les cultivars "L21", "L28" et "L13" comme tolérants et les cultivars "L1", "T3" et "L3" comme moyennement tolérants. De plus, une corrélation positive très significative entre le STI et Yp ainsi que Ys a été observée. Par conséquent, le paramètre STI peut être utilisé comme un outil important dans les programmes de sélection des génotypes de blé tolérants à la sécheresse. Son applicabilité a été confirmée par plusieurs études visant à examiner les indicateurs quantitatifs de la tolérance au stress (Sanchez-Reinoso *et al.*, 2020 ; Ayed *et al.*, 2021 ; Farid *et al.*, 2021 ; Khatibi *et al.*, 2022 ; Sabouri *et al.*, 2022).

Selon la théorie de Fernandez (1992), les 34 génotypes de blé étudiés peuvent être répartis en quatre groupes distincts en fonction de leur rendement en réponse au stress hydrique. Quatre lignées, dont "L21", "L28", "L13" et "L16", appartiennent au groupe A, présentant un fort potentiel dans les conditions normales et de stress. La capacité de cette approche à séparer les génotypes du groupe A des autres groupes est cohérente avec les résultats rapportés pour d'autres espèces comme le blé tendre (Mohammadi et Golkari, 2022), le riz (Lestari *et al.*, 2019), l'avoine (Akcura et Ceri, 2011), le haricot (Sanchez-Reinoso *et al.*, 2020) et le lin (Zare *et al.*, 2021). Ainsi, les lignées "L21", "L28", "L13" et "L16" peuvent être recommandées comme ressources utiles pour l'amélioration de la tolérance à la sécheresse chez les variétés de blé cultivées en conditions pluviales dans les zones semi-arides d'Algérie.

Conclusion

En guise de conclusion et à l'instar des résultats de cette étude, on peut dire que les stades primaires de développement chez les plantes annuelles herbacées sont les plus sensibles au déficit hydrique. L'objectif de ce travail était d'évaluer l'effet du stress imposé par le PEG-6000 sur les paramètres de germination et de croissance chez 34 génotypes de blé tendre dans des conditions contrôlées.

Les résultats obtenus à travers les paramètres étudiés montrent une large variation entre les génotypes testés. Cependant, l'effet de stress osmotique est plus significatif, indiquant que le déficit hydrique altère les paramètres liés aux deux stades de la phase physiologique, à savoir la germination et la croissance. Le stress causé par le PEG-6000 exerce un effet dépressif sur les traits racinaires tels que la longueur des racines et leur poids frais, ainsi que sur les paramètres des pousses comme la longueur de la première feuille et le poids de la matière fraîche aérienne. Dans la plupart des cas, la moyenne pour le nombre de racines augmente parallèlement à l'élévation de la concentration de PEG-6000, ce qui en fait un critère approprié pour le criblage de la tolérance au déficit hydrique au stade précoce de croissance des plantules.

Basée sur la moyenne de la somme des rangs (MSR), l'indice de tolérance au stress (STI) et le diagramme 3D de Fernandez, les génotypes "L21", "L28", "L13" et "L16" ont une bonne vigueur en conditions normales et stressantes. Ces conditions peuvent être considérées comme utiles pour les programmes de sélection visant à développer des variétés de blé tolérantes à la sécheresse.

Enfin, la technique PEG-6000 offre une plateforme efficace pour le dépistage rapide de la tolérance à la sécheresse chez les grandes populations en raison du manque d'espace et de ressources.

CHAPITRE 03

Évaluation de quelques caractères physico-chimiques et rhéologiques des farines de blé tendre.

CHAPITRE 03 : Évaluation de quelques caractères physico-chimiques et rhéologiques des farines de blé tendre.

Résumé

La sécurité alimentaire est un défi majeur pour tous les pays du monde. Parmi les espèces céréalières, le blé tendre demeure largement produit et consommé. Fournir des aliments de qualité nécessite un ensemble de tests pour mettre en évidence la valeur nutritionnelle et la qualité de transformation industrielle de cette céréale. Pour obtenir des produits de qualité, les céréales et leurs dérivés sont souvent soumis à des examens d'aptitude à la transformation industrielle. Cela implique nécessairement une évaluation de leurs aspects quantitatifs et qualitatifs. Dans ce cadre, notre travail a porté sur des analyses physico-chimiques et alvéographiques chez 34 génotypes de blé tendre afin d'évaluer leur qualité technologique. Les résultats obtenus ont montré des différences significatives entre les génotypes pour les paramètres : humidité, taux de cendres, teneur en protéines, teneur en gluten et les paramètres rhéologiques tels que la résistance, l'extensibilité, l'énergie de déformation et le rapport de configuration. La lignée L2 présente une teneur élevée en protéines (15.3 %) tandis que la lignée L27 présente un taux plus faible (12.35 %). La lignée L2 présente également une teneur élevée en gluten (36.2 %) contre 28.65 % pour la lignée L 27. La teneur en gluten est positivement corrélée à la teneur en protéines ($r= 0.997$). L'absorption en eau présente une liaison significative avec le taux de cendres ainsi qu'avec l'ensemble des paramètres alvéographiques, notamment la résistance ($r=0.509$), l'extensibilité ($r= -0.614$) et le rapport de configuration ($r= 0.607$). L'analyse en composantes principales a révélé trois groupes distincts en termes de qualité des farines, évaluée par la résistance et le rapport de configuration. Le groupe 3 considéré comme la meilleure en qualité. Comprend les lignées suivantes : L3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 14, 18, 19, 23, 24 et la lignée témoin T4. Ces résultats peuvent servir de référence pour les opérateurs intéressés par la qualité du blé. Ce domaine de recherche paraît intéressant et susceptible d'être davantage développé dans les années à venir.

Mots clés : protéine, gluten, paramètres alvéographiques, qualité.

Introduction

Le blé tendre est parmi les céréales les plus répandues dans le monde entier. Cette espèce occupe de grandes surfaces dans de nombreuses aires agro-écologiques du globe. En raison de la forte demande, la production de blé est globalement plus élevée que sa consommation comparativement aux autres produits agricoles (Grote *et al.*, 2021). Dans les minoteries, le blé, surtout le blé tendre ou le blé panifiable, est principalement transformé en farine. Que ce soit au niveau industriel ou domestique, la farine de blé est l'ingrédient de base d'un large éventail de préparations alimentaires, dont le pain, les biscuits, les muffins, les gâteaux et les pâtisseries (Padilla-Torres *et al.*, 2022).

Le grain de blé contient trois parties fondamentales. Chacune contient un type spécifique de nutriment avec une certaine proportion. Le grain contient 2 à 3% de germe (l'embryon), 13 à 17% de son (enveloppes) et 80 à 85% d'endosperme (l'albumen) (Belderok *et al.*, 2000). Issu des parois protectrices du grain, le son est riche en vitamines et minéraux B. Il contient la majorité des fibres du grain, essentiellement la cellulose, les pentosanes et les autres composées chimiques à base de xylose et d'arabinose qui sont liées aux protéines (Sramkova *et al.*, 2009 ; Rosell et Garzon, 2015). Le germe est une source importante de vitamine E et de matières grasses, en plus des protéines combinant les albumines et les globulines (Surget et Barron, 2005). L'endosperme est le compartiment où sont stockées les réserves qui seront utilisées pour la croissance de l'embryon pendant la germination ; ces réserves sont constituées de granules d'amidon incorporés dans une matrice protéique de gluten (Debiton, 2010).

Fournir des produits alimentaires satisfaisants pour le consommateur est l'objectif recherché par tous les fabricants d'aliments. Les attributs de qualité qui attirent les consommateurs sont principalement axés sur la couleur, le goût, l'emballage, les ingrédients, le prix et le type de cuisson. Les consommateurs ont tendance à acheter des produits de farine blanche sans additifs. Certains, par contre, préfèrent les produits cuits au four aux produits frais.

Comme déjà mentionné, la farine est l'un des dérivés céréaliers les plus consommés. Légalement, la dénomination "farine" désigne exclusivement le produit de la mouture du grain de blé tendre nettoyé et industriellement pur. Le blé tendre se différencie du blé dur par son grain à albumen farineux (vitreux ou translucide chez le blé dur) et sa faible teneur en protéine (plus haute chez le blé dur) (Sindhu et Khatkar, 2021). Le broyage consiste à enlever les parties externes et le germe tout en conservant uniquement l'endosperme farineux, qui sera progressivement dégradé pour obtenir de la farine raffinée.

La farine n'est considérée comme ayant une qualité de cuisson satisfaisante que si elle satisfait toutes les normes exigées par le législateur et le consommateur. Pour cela, le blé destiné à la mouture et surtout la farine qui en résulte font l'objet d'un ensemble de tests physicochimiques et

rhéologiques déterminant leur utilisation ultérieure. En ce qui concerne le blé, les tests effectués sont généralement le poids spécifique, la dureté, l'indice de Zélény, l'humidité, les protéines et le gluten (Lamara *et al.*, 2021). Quant à la farine, ce sont principalement des tests physicochimiques et rhéologiques qui sont les plus effectués.

Le contrôle de la qualité du grain commence au champ. Toutefois, le choix de la variété est une étape importante s'il est suivi d'un bon itinéraire technique. Les agriculteurs devraient donc opter pour des variétés de blé plus productives, mais aussi qui répondent le mieux aux critères d'aptitude à la transformation industrielle. Ils devraient aussi respecter toutes les pratiques culturales, de l'irrigation, au désherbage et à la fertilisation jusqu'à la période de maturation des cultures et ce afin de récolter des grains bien construits (Benniou, 2012). La performance de mouture dépend de plusieurs facteurs, les plus influents étant ceux qui résultent de l'interaction entre le génotype et les conditions environnementales. Les caractéristiques de la qualité du blé sont influencées par les conditions climatiques, essentiellement la sécheresse et les températures élevées, surtout dans les régions semi-arides (Vida *et al.*, 2014). La température est un facteur important assurant le passage d'un stade à un autre pendant la période de croissance des cultures. De nombreuses études indiquent que la combinaison de la sécheresse et des températures extrêmes entraîne un raccourcissement du cycle de culture et notamment de la phase de remplissage du grains ; ce qui réduit la production agricole de par la diminution du poids de mille grains et du poids spécifique (Dupont *et al.*, 2006 ; Ababaei et Chenu , 2020).

De nombreuses recherches ont montré que les conditions environnementales défavorables modifient la composition des protéines et leur position sur le grain. En plus, elles accélèrent la durée de synthèse de gluténine ; ce qui réduit la résistance de la pâte (Labuschange *et al.*, 2009 ; Balla *et al.*, 2011). Des effets négatifs sont également constatés à la suite de l'exposition de l'amidon à des températures élevées, ces effets provoquent des changements dans la distribution et la taille des granules d'amidon ainsi que leur accumulation dans l'endosperme en raison de la sensibilité aux enzymes de l'amidon (Liu *et al.*, 2011 ; Katyal *et al.*, 2022). En outre, il convient de noter que ces modifications sont étroitement liées à d'autres facteurs tels que le facteur variétal et la quantité d'azote apporté.

Ce travail porte sur l'appréciation de la qualité technologique des farines appartenant à quelques lignées avancées de blés tendre sélectionnées dans la région semi-aride de Sétif et ce à travers des nombreux attributs physico-chimiques et rhéologiques.

Matériel et méthodes

1. Préparation des échantillons de la farine

Le matériel végétal correspond à celui décrit aux chapitres 1 et 2. Il comprend 34 géotypes de blé tendre, dont trente lignées avancées et quatre cultivars témoins : Mawna, Hidhab, Rmada et Acsad₁₁₃₅. Les échantillons de grains testés ont été prélevés de manière aléatoire à partir de chaque lot de semence stocké en sacs.

Après la récolte, les grains de blé ont été stockés dans des sacs en papier. Avant l'analyse, les grains ont été nettoyés manuellement pour éliminer les grains d'adventices, les pierres, la paille, la poussière, ou tout autre corps étranger. Cette étape a été suivie d'une phase de conditionnement qui a consisté à tremper les grains de blé dans l'eau pendant 24 heures, afin de permettre leurs imbibitions et de faciliter une diffusion rapide de l'eau dans l'amande (albumen, germes) et les enveloppes. L'objectif était d'atteindre une humidité de 16% dans les grains, ce qui favorise une bonne séparation du son et du grain pendant la mouture.

La farine a été obtenue par mouture des grains conditionnés, à l'aide d'un moulin d'essai de type Chopin CD1 (Photo 6), au niveau des moulins de Ben Hamadi. Cette mouture a nécessité plusieurs passages de grains, et les farines de différents passages ont été combinées et bien mélangées. Enfin, le moulin a été soigneusement nettoyé entre chaque échantillon, afin d'éviter tout mélange entre les différents échantillons.

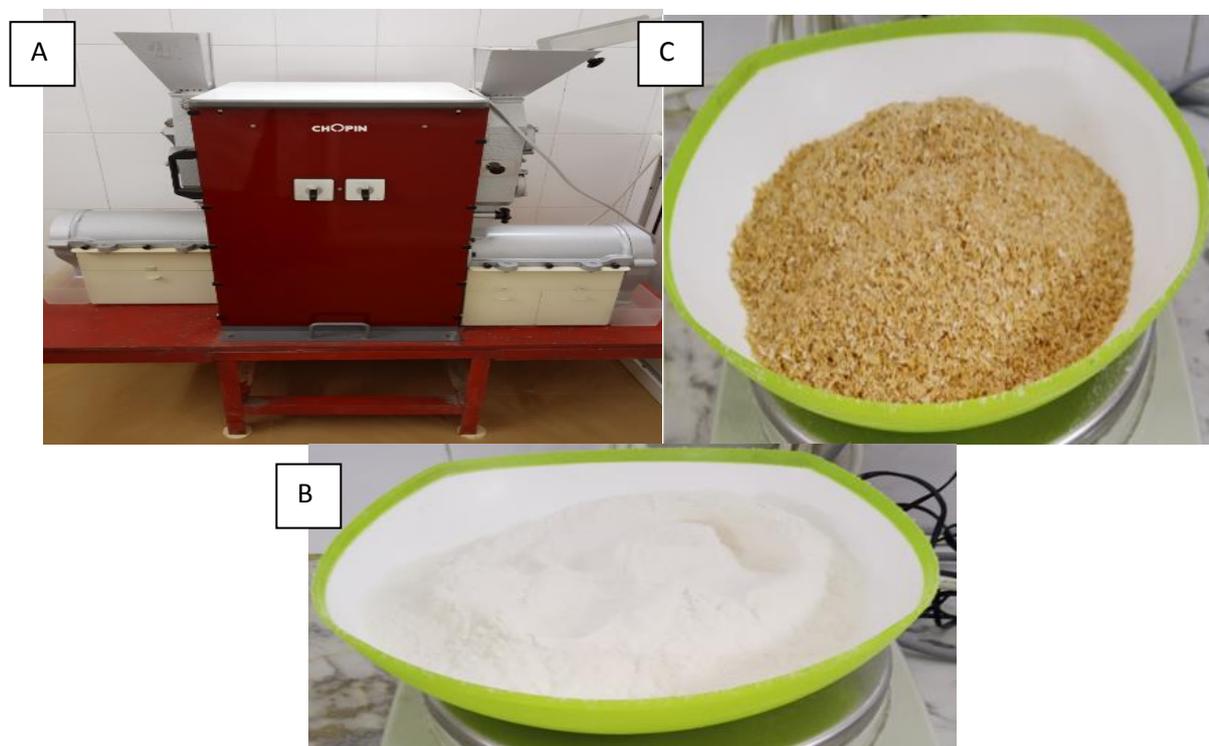


Photo 6 : le moulin d'essai (A) est utilisé pour produire de la farine (B) et éliminer le son extrait (C).

2. Evaluation des propriétés physico-chimiques des farines

La qualité des farines a été évaluée à l'aide d'un appareil appelé L'INFRAMATIC de type PERTEN, comme le montre la photo 7. Le principe de cet appareil repose sur l'utilisation des rayonnements infrarouges. Il suffit alors de verser l'échantillon représenté par le produit moulu, et après 1 minute, les résultats seront affichés sur l'écran de l'appareil. De ce fait, l'évaluation des caractéristiques physico-chimiques telles que l'humidité, les cendres, les protéines, le gluten humide et l'absorption en eau a été réalisée sur l'ensemble des génotypes étudiés.



Photo 7 : L'INFRAMATIC de type PERTEN utilisé pour évaluer la qualité des farines de blé.

3. Evaluation des propriétés rhéologiques des farines

Le comportement rhéologique de la pâte de farine moulue a été déterminé à l'aide de l'alvéographe de Chopin CD1 (Photo 8). Cet appareil analyse plusieurs paramètres tels que la résistance de la déformation de la pâte (P), l'extensibilité de la pâte (L), le rapport de configuration (P/L) et l'énergie de déformation (W).



Photo 8 : l'alvéographe de Chopin utilisé pour déterminer les paramètres rhéologiques de la farine de blé.

4. Analyse des données

Les données obtenues ont été traitées par une analyse de la variance (ANOVA), à un seul facteur (variété). En cas de différences significatives, la comparaison des moyennes a été réalisée sur la base du calcul de la plus petite différence significative au seuil de probabilité de 5% (Ppds_{5%}).

Résultats et discussion

1. Paramètres physico-chimiques des farines

A l'exception de l'absorption en eau, l'analyse de la variance révèle un effet "génotype" très hautement significatif ($p < 0.001$) pour l'ensemble des variables mesurées, avec des coefficients de variation très faibles (Tableau 14). Ces résultats indiquent la présence d'une variabilité importante entre les génotypes étudiés. Les faibles valeurs du coefficient de variation pour tous les caractères mesurés suggèrent faible erreur expérimentale et une bonne précision de la manipulation des tests effectués.

Tableau 14 : Carrés moyens de l'analyse de la variance des variables étudiées.

Variables	Somme carrées des moyens		
	Génotype	Erreur	CV (%)
Ddl	33	34	
Humidité	1.58***	0.01	0.57
Cendres	0.01**	0.0003	3.00
Protéines	1.31***	0.05	1.63
Gluten humide	9.08***	0.58	2.37
Absorption en eau	16.66 ^{ns}	11.82	5.61
Résistance de la pâte	1171.17***	0.44	0.68
Extensibilité de la pâte	113.58***	0.65	0.79
Energie de déformation	8341.53***	0.21	0.17
Rapport de configuration	0.45***	0.0001	1.11

ns, et*** : différences non significatives et hautement significatives au seuil de probabilité de 1%.

Les analyses des valeurs moyennes indiquent que les valeurs minimales et maximales extrêmes varient d'un caractère à un autre et d'un génotype à un autre. Ainsi, aucun génotype ne présente les

valeurs souhaitées pour plusieurs caractères à la fois (Tableau 15). Ce résultat souligne la difficulté d'identifier des génotypes qui cumulent les valeurs désirées pour l'ensemble des variables.

Tableau 15 : valeurs moyennes des variables étudiées chez les différents génotypes de blé.

Variabes	Moyenne	Etendu	Ppds(5%)
H	14.04	11.10 – 14.80	0.16
TC	0.63	0.46 – 0.75	0.04
TP	13.71	12.35 – 15.30	0.45
GH	32.1	28.65 – 36.20	1.55
AE	61.33	55.70 – 71.70	6.99
P	98.09	36.00 – 149.50	1.35
L	101.24	50.00 – 167.00	1.63
W	269.91	118.00 – 367.00	0.92
P/L	1.07	0.21 – 2.46	0.02

H: Humidité du farine(%), *TC*: taux de cendres(%), *TP*: taux de protéines(%), *GH*: gluten humide(%), *AE*: absorption en eau(%), *P*: ténacité(mm), *L*: extensibilité(mm), *W*: énergie de déformation(10^{-4} J), *P/L*: rapport de configuration.

1.1. Humidité de la farine

La moyenne de la teneur en humidité des farines s'élève à 14.04%. La valeur minimale (11.10 %) est obtenue pour la lignée "L21", tandis que la valeur maximale (14.80 %) est mesurée pour la lignée "L4". Il est à noter que la teneur en humidité des farines est influencée par l'espèce, la variété, et les conditions de stockage (Eshun, 2012).

La teneur en eau joue un rôle essentiel dans la durée de conservation de la farine de blé. Plus la teneur en eau est faible, plus la stabilité au stockage est élevée (Nasir *et al.*, 2003). Une teneur en humidité supérieure à 14% peut entraîner des réactions chimiques telles que l'oxydation des lipides, la réaction de Maillard et des réactions enzymatiques comme l'hydrolyse des protéines, des lipides et des glucides. De plus, une humidité élevée favorise la croissance des moisissures, augmente la charge microbienne, et permet l'infestation par les insectes. Les résultats obtenus dans cette étude sont cohérents avec ceux de Makawi *et al.* (2013), qui ont rapporté des valeurs proches, variant de 13.4 à 13.8%, ainsi que ceux de Mutlu *et al.* (2011), qui ont observé une plus grande variation, comprise entre 11.7 à 16.9 % pour 79 échantillons de farines de blé tendre. Nos résultats sont également en accord avec ceux de Pekmez *et al.*, (2018), qui ont trouvé des estimations de teneur en humidité variant de 11.1 à 14.8 % pour huit échantillons de farines.

1.2. Teneur en cendres

Pour la teneur en cendres, la moyenne de l'essai est de l'ordre de 0.63%, soit une étendue d'un minimum de 0.46 % observé chez la lignée "L16" et un maximum de 0.75 % enregistré chez "L15".

La teneur en cendres est un paramètre extrêmement important pour déterminer la pureté de la farine en ce qui concerne la contamination par le son. Elle représente alors la teneur en matière minérale de la farine (Atwell et Finnie, 2016).

La littérature rapporte des différences très importantes entre les teneurs en cendres des farines examinées. Cette variation est attribuable à des facteurs intrinsèques comme les facteurs génotypiques, mais aussi à des facteurs extrinsèques comme les réserves minérales du sol, ainsi que les conditions agro-écologiques et climatiques (Piironen et Salmenkallio-Marttila, 2009). La farine caractérisée par une teneur en cendres plus élevée est habituellement moins pure et contient plus de particules de son fin et d'endosperme adjacentes au son (Hemery *et al.*, 2011 ; Czaja *et al.*, 2020). Selon Boudreau (1992) et Feuillet (2000), la farine qui contient moins de 0.5 % de cendres, entre 0.5 et 0.6 %, et entre 0.62 et 0.75 % est destinée, respectivement, à la pâtisserie, à la panification et à la biscuiterie. En contraste avec les résultats de cette étude, Makawi *et al.* (2013) rapportent des valeurs plus faibles de ce paramètre oscillant entre 0.31 et 0.39 %.

1.3. Teneur en protéines de la farine

La moyenne générale du taux de protéines de l'essai s'élève à 13.71 %. Les données du tableau 15 indiquent que la lignée "L2" exprime le taux le plus élevé avec 15.3 % tandis que la plus faible valeur de cette variable est enregistrée chez la lignée "L24" avec une moyenne minimale de 12.35 %. Des résultats similaires (12.14– 15.62 %) ont été obtenus par Tawfeuk et Gomaa (2017) sur la qualité des semoules chez différents génotypes de blé dur. D'autre part, Mutlu *et al.* (2011) rapportent des valeurs supérieures (11.7 – 19.2 %) comparées aux résultats de la présente étude.

Selon les travaux de recherche préalablement publiés, les protéines sont importantes pour déterminer la valeur nutritive du blé, tant pour la consommation humaine qu'animale, et sont également des déterminants importants de la qualité de cuisson (Bordes *et al.*, 2008). Les protéines constituent habituellement de 7 à 15 % de la farine de blé tendre destinée aux produits de cuisson (Atwell et Finnie, 2016). Les différences enregistrées pour cette variable peuvent s'expliquer par la teneur en protéines du grain de blé, la distribution des protéines dans la graine et le taux d'extraction de la farine par rapport au grain (Brown *et al.*, 1991 ; Alais *et al.*, 2008).

1.4. Teneur en gluten humide

Pour ce paramètre, l'analyse des résultats montre que la moyenne de l'essai est de 32.1 %, avec la valeur de gluten humide la plus élevée (36.2 %) enregistrée chez la lignée "L2" et la plus faible (28.65 %) chez la lignée "L24". Nos résultats sont cohérents avec ceux obtenus par Khan *et al.* (2009) sur des blés pakistanais, dont les valeurs ont varié de 28.47 à 38.83 %. Mutwali (2011), dans

une étude portant sur 20 cultivars soudanais, a trouvé des estimations plus élevées, comprises entre 28.63 à 46.94 %.

Il est à noter que de nombreuses études ont montré que les protéines du gluten sont principalement responsables des propriétés fonctionnelles de la farine de blé tendre (Simic *et al.*, 2006). Ainsi, les protéines jouent un rôle important dans la détermination de la qualité de cuisson du blé, en conférant à la pâte plusieurs propriétés comme la capacité d'absorption en eau, la cohésion, la viscosité et l'élasticité (Oikonomou *et al.*, 2015). Selon Branger *et al.* (2007), la teneur en gluten humide de la farine varie généralement entre 23 et 30 %. Cependant, la quantité de gluten humide est principalement influencée par l'environnement, tandis que sa qualité est liée essentiellement au génotype. De plus, le rendement en gluten humide indique la qualité des protéines et par conséquent la qualité de cuisson de la farine (Kaushik *et al.*, 2015). Nos résultats sont similaires à ceux de Kaushik *et al.*, (2015). Ainsi, nous avons constaté que la teneur en gluten humide de certaines farines de blé tendre variait entre 28.65 et 36.2 %. Cette teneur relativement faible peut être liée aux conditions climatiques qui peuvent limiter la disponibilité de l'azote, son assimilation par la plante et son attribution au grain. Le niveau de gluten humide peut varier considérablement selon l'année comme signalé par Kleijer *et al.* (2011).

1.5. Absorption en eau

Pour l'absorption en eau, les valeurs varient d'un minimum de 55.7 % chez la lignée "L20" à un maximum de 71.7 % chez la lignée "L18", avec une moyenne de l'essai de 61.33 %. Dans une autre étude, Fras *et al.* (2020), ont rapporté des valeurs de ce paramètre comprises entre 60.2 à 64.5 %.

Il est à souligner que l'absorption d'eau est depuis longtemps considérée comme l'un des paramètres de qualité les plus pertinents pour déterminer les propriétés fonctionnelles de la farine (Bushuk et Békés, 2002). Dans l'ensemble, les génotypes étudiés ne reflètent pas de différences significatives en ce qui concerne l'absorption d'eau, mais ils enregistrent des différences par rapport à la composition chimiques. Ainsi, la capacité de la farine à absorber l'eau dépend d'une part de sa composition chimique et physique qui est influencée par le génotype du blé tendre, les facteurs environnementaux et les pratiques agricoles pendant la croissance, et d'autre part des techniques de transformation utilisées par le meunier pour convertir le blé en farine (Sapirstein *et al.*, 2018).

2. Paramètres alvéographiques des farines

Les données de la courbe alvéographique (Annexe 1) fournissent des informations sur la résistance et l'extensibilité de la pâte. La qualité du gluten est déterminée par son extensibilité et son élasticité (Simic *et al.*, 2006). Cependant, l'effet du génotype est dominant pour les paramètres qualitatifs du gluten. La fraction de gliadine est une fraction protéique très hétérogène. Elle est responsable des propriétés visqueuses de la pâte pendant le mélange (Fido *et al.*, 1997).

Inversement, la fraction de gluténine est une protéine polymérique qui présente un degré élevé de liaison intermoléculaire (Gianbielli *et al.*, 2001). Elle réduit l'extensibilité de la pâte (Wieser *et al.*, 2001). C'est la fraction protéique responsable de la résistance de la pâte.

2.1 Résistance de la pâte "P" à la déformation

La valeur la plus faible du paramètre "P", qui représente la ténacité de la pâte, a été trouvée chez la farine de la lignée "16", avec 36 mm H₂O, tandis que, la valeur la plus élevée de la résistance de la pâte a été trouvée chez la farine de la lignée "L8", avec 149.5 mm H₂O. Aldovrandi et Vitali (1995) indiquent que les valeurs du paramètre "P" pour la gamme de qualité standard de la pâte de blé se situent entre 60 et 80 mm H₂O. Une pâte de très bonne qualité a des valeurs comprises entre 80 et 100 mm H₂O, tandis que des pâtes de blé extra-fortes sont caractérisées par une valeur "P" supérieure à 100 mm H₂O. Makawi *et al.* (2013) ont trouvé des résultats assez élevés pour la résistance, avec un intervalle de 160–346 mm H₂O, dans une expérience portant sur l'évaluation des blés tendres au Soudan.

2.2. Extensibilité de la pâte "L"

La moyenne de l'essai est de 101.24 mm, avec des valeurs extrêmes d'extensibilité de la pâte minimale et maximales de l'ordre de 50 et 167 mm, observées respectivement chez les farines des lignées "L5" et "L16". Le paramètre d'extensibilité "L" de 100 mm est généralement considéré comme un bon indicateur pour la fabrication de pain. Des valeurs extrêmes élevées (142–202 mm) ont été enregistrées pour ce paramètre dans une étude antérieure réalisée par Makawi *et al.* (2013).

2.3. Energie de déformation «W» ou résistance au four

L'énergie de déformation ou de cuisson varie de 118.10^{-4} à 367.10^{-4} J, avec une moyenne générale de l'essai de 269.91 J. Ces valeurs sont notées respectivement chez les lignées "L21" et "L8". Dans leur étude, Mutlu *et al.* (2011) ont trouvé des valeurs variant d'un minimum de 72 à un maximum de 312.10^{-4} J.

Des recherches sur la qualité de panification des blés américains et canadiens ont mis l'accent sur la mesure de la racine carrée du volume d'air nécessaire pour gonfler la bulle de pâte jusqu'à ce qu'elle rompe : valeur W (Faridi et Rasper, 1987). Ainsi, la pâte de blé de qualité standard est caractérisée par une valeur «W» comprise entre 160 et 200 J, tandis que la pâte de blé de bonne qualité est caractérisée par une valeur «W» comprise entre 220 et 300 J et même supérieur à 300 (Bordes *et al.*, 2008).

2.4. Rapport de configuration «P/L»

La moyenne du rapport de configuration «P/L» de la courbe s'élève à 1.07, avec un minimum de 0.21 observé chez "L16" et un maximum de 2.46 noté chez "L5". Un rapport «P/L» de 0.50 indique

soit une pâte de blé résistante et très extensible, soit une pâte de blé modérément extensible et moins résistante. Une valeur de 1.50 indique une pâte de blé très forte et moyennement extensible, tandis qu'une pâte de blé avec une valeur «P/L» comprise entre 0.40 et 0.80 convient à la production en boulangerie.

Les propriétés rhéologiques et fonctionnelles du gluten de blé dépendent de plusieurs paramètres tels que: (i) le rapport entre les gliadines et les gluténines (Khatkar *et al.*, 1995 ; Pedersen et Jorgensen, 2007), (ii) la distribution de la taille moléculaire, (iii) la structure des polypeptides de gluténines, (iv) le rapport de polypeptides de gluténines à haut/ faible poids moléculaire, (v) la force de liaison entre les gliadines et les gluténines, et (vi) la réduction ou oxydation de l'activité des gluténines. La cohésion et l'extensibilité du gluten sont attribuées aux gliadines monomériques, tandis que les gluténines contribuent à l'élasticité et à la force du gluten (Rodrigues *et al.*, 2005). Ainsi, le rapport des gluténines aux gliadines contrôle la force et l'extensibilité de la pâte (Khatkar *et al.*, 2002 ; Wrigley *et al.*, 2006).

La richesse des sous unités α et γ gliadines en soufre, contenant des acides aminés tels que la méthionine et la cystéine, conduit à la formation de liaisons intra chaînes disulfure responsables de leur structure plissée, qui détermine en outre la nature des liaisons non covalente. Ces interactions protéines-protéines non covalents (principalement des liaisons hydrogènes et des interactions hydrophobes) sont principalement responsables de la viscosité des gliadines et de l'extensibilité du gluten (Hamer et Van Vliet, 2000).

3. Structuration et corrélation des variables, et classification des géotypes

L'analyse des corrélations phénotypiques (Tableau 16) montre que l'humidité de la farine est positivement corrélée avec la résistance ($r = 0.600$), l'énergie de déformation ($r = 0.586$) et le rapport de configuration "P/L" ($r = 0.408$). En revanche, elle est négativement associée avec l'extensibilité de la pâte ($r = -0.427$). Des corrélations positives et significatives ont également été observées entre le taux de cendres avec l'absorption en eau ($r = 0.492$), la résistance de la pâte ($r = 0.419$) et le rapport "P/L" ($r = 0.430$). Cependant, le taux de cendres est négativement corrélé à l'extensibilité de la pâte ($r = -0.446$). Une autre corrélation positive et significative est celle liant le taux de protéines et le gluten humide ($r = 0.997$). Ce résultat est similaire à celui de Chung et Ohm (1996).

Tableau 16 : Coefficients de corrélations entre les variables étudiées.

Variabes	H	TC	TP	GH	AE	P	L	W	P/L
H	1	0.208	0.253	0.228	0.099	0.600	-0.427	0.586	0.408
TC	0.208	1	0.247	0.214	0.492	0.419	-0.446	0.263	0.430
TP	0.253	0.247	1	0.997	-0.143	-0.013	-0.009	0.006	-0.097

GH	0.228	0.214	0.997	1	-0.174	-0.051	0.028	-0.03	-0.134
AE	0.099	0.492	-0.143	-0.174	1	0.509	-0.614	0.271	0.607
P	0.60	0.419	-0.013	-0.051	0.509	1	-0.795	0.855	0.862
L	-0.427	-0.446	-0.009	0.028	-0.614	-0.795	1	-0.426	-0.921
W	0.586	0.263	0.006	-0.03	0.271	0.855	-0.426	1	0.510
P/L	0.408	0.430	-0.097	-0.134	0.607	0.862	-0.921	0.510	1

H: Humidité farine, *TC*: taux de cendres, *TP*: taux de protéines, *GH*: gluten humide, *AE*: Absorption en eau, *P*: résistance de la pâte, *L*: extensibilité de la pâte, *W*: énergie de déformation, *P/L*: rapport de configuration. Valeurs en gras différent significativement de 0 au seuil de 5 %.

Le tableau 16 indique également que l'absorption en eau est positivement corrélée à la résistance de la pâte ($r = 0.509$) et au rapport de configuration «P/L» ($r = 0.607$). En revanche, ce paramètre est négativement lié à l'extensibilité de la pâte ($r = -0.614$). Haraszi et al. (2004) ont trouvé le même résultat concernant la relation entre la résistance de la pâte et l'absorption en eau. L'extensibilité de la pâte, en plus d'être négativement corrélée à l'humidité de la farine, au taux de cendres et à l'absorption en eau, présente également d'autres associations négatives avec la résistance de la pâte ($r = -0.795$), l'énergie de déformation ($r = -0.426$) et le rapport «P/L» ($r = -0.921$). Ces deux dernières propriétés rhéologiques sont positivement et significativement corrélées entre-elles ($r = 0.510$). L'absence de corrélation entre le gluten humide et les paramètres alvéographiques est également rapportée par Tanacs et al. (2008). La littérature rapporte également que les quantités relatives d'amidon, de pentosanes, de son et de protéines endommagées dans la farine contribuent positivement à l'absorption en eau, tandis que le taux d'humidité et l'activité enzymatique contribuent négativement à l'absorption en eau (Sapirstein et al., 2018).

La qualité des protéines, telle que reflétée par les propriétés viscoélastiques de la pâte, peut être un facteur affectant l'absorption en eau lors de la cuisson (Cauvain et Young, 2009). L'absence de corrélations significatives entre la teneur en humidité, le taux de protéines, le gluten humide et la qualité des protéines, exprimée par le rapport «P/L», reflétée par les propriétés viscoélastiques de la pâte, peut être un facteur affectant l'absorption en eau pendant la cuisson.

L'analyse en composantes principales (ACP) montre que les deux premiers axes présentent des valeurs propres supérieures à l'unité, expliquant ensemble 71.10 % de la variation totale présente dans le matériel végétal évalué (Tableau 17, Figure 20). Le premier axe (F1) explique 46.70 % de cette variation, tandis que le deuxième axe (F2) explique 24.40 %.

La première composante principale (F1) est positivement associée à l'humidité de la farine, au taux de cendres, à l'absorption d'eau, à la résistance de la pâte, à l'énergie de déformation et au rapport de configuration «P/L». En revanche, elle est négativement corrélée à l'extensibilité de la pâte. Quant à la deuxième composante principale (F2), elle est positivement et fortement corrélée au taux de protéines et au gluten humide ($r = 0.982$), tableau 4. Ces résultats indiquent que la structuration des paramètres mesurés est essentiellement décrite par ces deux composantes, qui

regroupent 7 paramètres pour le premier axe et 2 paramètres pour le deuxième axe. Ces résultats suggèrent que la qualité technologique du blé tendre dépend principalement de la résistance de la pâte à la déformation, du rapport de configuration "P/L", de la quantité de protéines et du gluten humide.

Tableau 17 : Coefficients de corrélations entre les variables et les facteurs.

Paramètres	F1	F2
H	0.607	0.341
TC	0.574	0.251
TP	0.031	0.982
GH	-0.013	0.982
AE	0.663	-0.246
P	0.955	-0.031
L	-0.885	0.06
W	0.733	0.034
P/L	0.909	-0.162
Valeurs propres	4.19	2.20
Contribution (%)	46.65	24.44

Légende: *H*: Humidité farine, *TC*: taux de cendres, *TP*: taux de protéines, *GH*: gluten humide, *AE*: Absorption en eau, *P*: résistance de la pâte, *L*: extensibilité de la pâte, *W*: énergie de déformation, *P/L*: rapport de configuration.

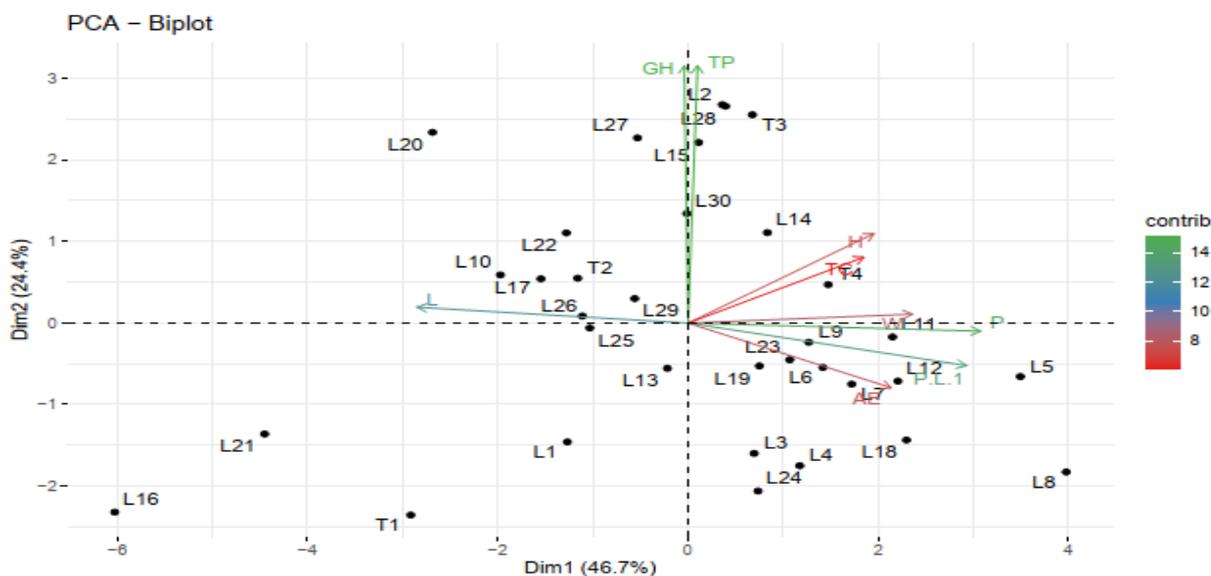


Figure 20 : Représentation des génotypes de blé sur le plan défini par les deux composantes principales F1 et F2.

Le groupement hiérarchique agglomératif (AHC) basé sur les moyennes des paramètres physico-chimiques et alvéographiques mesurés identifie trois groupes distincts (Figure 4). Le premier groupe contient onze variétés, soit 32% de l'ensemble des génotypes évalués. Ces génotypes sont : L1, T1, T2, L10, L16, L17, L21, L22, L25, L29 et L30. Le deuxième groupe comporte six variétés,

soit 18% des génotypes, ces génotypes sont : L2, T3, L15, L20, L27 et L28. Le troisième groupe est le plus large, avec 17 génotypes, soit 50% de l'ensemble des génotypes.

Des différences significatives ont été constatées entre les trois groupes en ce qui concerne la teneur en gluten humide. Les teneurs faibles, moyennes et élevées ont été enregistrées chez les groupes G3, G2 et G1 successivement. Concernant la résistance, les valeurs les plus élevées ont été observées chez les variétés du troisième groupe, tandis que les plus faibles valeurs de résistance ont été enregistrées chez les variétés du groupe 1. Les génotypes du groupe 2 ont des valeurs de résistance intermédiaires. Cela confirme que la qualité des farines dépend essentiellement de la qualité de gluten et non plus seulement de sa quantité, comme l'ont indiqué Shewry et Halford, (2002). Plusieurs études montrent que la quantité de protéines et de gluten humide est contrôlée par de nombreuses gènes (Conti *et al.*, 2011 ; Li *et al.*, 2012 ; Maphosa *et al.*, 2013).

Ces résultats nous permettent de conclure que le groupe 3 présente la meilleure qualité rhéologique, suivi par le groupe 2, tandis que, le groupe 1 offre une qualité médiocre.

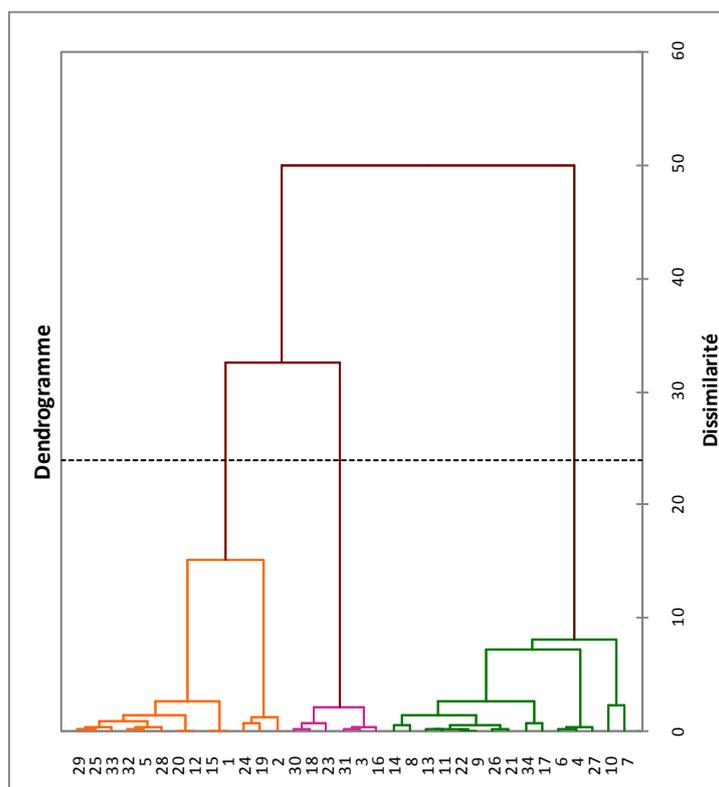


Figure 21 : Classification hiérarchique ascendante des 34 génotypes de blé basée sur 9 paramètres physico-chimiques et alvéographiques mesurés.

Tableau 18 : Paramètres génétiques et non génétiques des variables étudiées.

Paramètres	H	TC	Pro	GH	AE	P	L	W	P/L
σ^2_p	0.79	0.004	0.66	4.54	8.33	585.58	556.79	4170.76	0.23
σ^2_e	0.003	0.0002	0.03	0.29	5.91	0.22	0.32	0.10	0.00
σ^2_g	0.79	0.004	0.63	4.25	2.42	585.36	556.47	4170.66	0.23
$H^2_{sl}(\%)$	99.60	95.94	96.19	93.61	29.05	99.96	99.94	99.99	99.97
$CV_g(\%)$	6.32	10.31	5.79	6.42	2.54	24.67	23.30	23.93	44.62
CV_g/ CV_e	11.16	3.44	3.55	2.71	0.45	36.43	29.33	142.33	40.10

H: Humidité de farine, TC: taux de cendres, Pro: taux de protéines, GH: gluten humide, AE: absorption en eau, P: résistance de la pâte, L: extensibilité de la pâte, W: énergie de déformation, P/L: rapport de configuration, σ^2_p : Variance phénotypique, σ^2_e : Variance environnementale, σ^2_g : Variance génotypique, H^2_{sl} : Héritabilité au sens large, CV_g : Coefficient de variation génotypique, CV_g/ CV_e : Indice de variation.

Dans les programmes d'amélioration génétique des plantes, l'étude des facteurs génétiques et non génétiques influençant l'expression phénotypique d'un caractère donnée demeure très importante pour l'efficacité de la sélection (Hannachi *et al.*, 2017 ; Fellahi *et al.*, 2020). Les variances phénotypiques, environnementales et génotypiques, ainsi que l'héritabilité au sens large, le coefficient de variation génotypique et l'indice de variation sont présentées dans le tableau 18.

La variance environnementale varie de 0 (valeur minimale pour le rapport de configuration) à 5.91 pour l'absorption en eau. Les valeurs maximales et minimales pour la variance phénotypique et génotypique sont respectivement de 4170.66 et 0.004, enregistrées pour les caractères de l'énergie de déformation et la teneur en cendres. D'après les données du tableau 4, les valeurs de la variance génotypiques sont faibles comparées à celles de la variance phénotypique. Ces résultats corroborent ceux obtenus par Akçura *et al.* (2009) et Taneva *et al.* (2019) sur la qualité des grains de blé dur.

Le coefficient de variation génotypique (CV_g) varie en fonction du caractère analysé. Il présente des valeurs faibles, inférieures à 10 %, pour la teneur en eau, en protéines, en gluten humide et l'absorption en eau. Il est moyen pour les autres caractères. Dans une étude de Devesh *et al.*, (2018) sur l'estimation de la variabilité génétique chez le blé des valeurs élevées du coefficient de variation phénotypique ont été rapportées par rapport au coefficient de variation génotypique pour la teneur en protéines et le gluten humide. Taneva *et al.*, (2019), quant à eux trouvé des valeurs faibles du coefficient de variation génotypique pour les caractères taux de protéines, gluten humide, vitrosité, poids à l'hectolitre et poids de mille grains, mais des valeurs élevées pour le rendement, le test de sédimentation et l'indice de jaune.

Un coefficient de variation élevé indique une plus grande variabilité entre les génotypes pour le caractère considéré, tandis qu'un coefficient faible traduit une faible variabilité entre les génotypes (Fellahi *et al.*, 2013). Les valeurs de l'indice de variation (CV_g/ CV_e) sont supérieures à l'unité 1 pour la plupart des caractères, à l'exception de l'absorption en eau. Les caractères ayant des valeurs

supérieures à 1 sont considérés comme des moins affectées par l'effet de l'environnement, contrairement à l'absorption en eau qui est fortement influencée par l'environnement, empêchant l'expression phénotypique de ce caractère.

L'héritabilité est un élément clé sur lequel se concentrent les améliorateurs. Elle donne une indication globale sur le degré de transmission des caractères aux générations suivantes. Les caractères analysés dans cette étude sont fortement héritable, avec des valeurs supérieures à 90 %, à l'exception de l'absorption en eau qui présente une valeur très faible (29.05 %). Plus un caractère est héritable, plus la sélection est rapide et efficace. Lamara et *al.*, (2021), dans une étude sur l'évaluation de la qualité de 34 génotypes de blé tendre, ont rapporté des valeurs élevées d'héritabilité pour la teneur en cendres, le poids de mille grains, le test de sédimentation, le gluten humide et sec, la teneur en protéine et l'indice de chute. Cependant, des valeurs moyennes ont été enregistrées pour le rendement et l'humidité.

Conclusion

Les résultats de cette étude indiquent que les génotypes étudiés réagissent différemment au nombre de caractères qualitatifs évalués. Les différences remarquées entre les sujets sont probablement dues à la variation génétique. Les valeurs extrêmes minimales et maximales observées pour les caractères considérés dans cette étude varient selon le caractère lui-même et le génotype testé, suggérant la difficulté de combiner toutes les caractéristiques souhaitées dans le même fond génétique.

Les deux premiers axes de l'analyse en composantes principales (ACP) expliquent 71.09 % de la variation totale observée au niveau du matériel végétal évalué. L'humidité de la farine, le taux de cendres, l'absorption d'eau, la résistance de la pâte, l'énergie de déformation et le rapport de configuration "P/L" sont positivement corrélés au premier axe, tandis que l'extensibilité de la pâte est négativement liée à cet axe. D'autres parts, le second axe est positivement corrélé au taux de protéines et au gluten humide.

La classification hiérarchique et l'analyse multivariée basées sur l'ensemble des variables physico-chimiques et alvéographiques mesurées indiquent que les génotypes évalués se répartissent en trois groupes. Dans le groupe trois, caractérisé par une meilleure qualité technologique, comprennent les lignées "L3, L4, L5, L6, L7, L8, L9, L11, L12, L13, L14, L18, L19, L23, L24 et L26, ainsi que le témoin T4". Ces génotypes devraient être exploités pour des fins de sélection afin d'améliorer leur aptitude pour les différents aspects technologiques, dans le but d'une éventuelle utilisation par les moulins.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

Les zones semi-arides posent des défis majeurs à la culture du blé tendre en raison des stress hydriques récurrents et de la variabilité climatique. Cette étude a permis d'identifier des génotypes prometteurs combinant performance agronomique, tolérance au stress et qualité technologique, offrant ainsi des pistes concrètes pour l'amélioration variétale.

L'analyse de la variabilité génétique (Chapitre 1) a révélé des différences hautement significatives entre les génotypes pour la plupart des caractères agronomiques, bien que l'interaction génotype-environnement ait atténué l'expression de certains traits. Parmi les lignées évaluées, L1, L20, L28 et L18 se sont distinguées (effet moyen année) par leur rendement en grains supérieur relativement au meilleur témoin, associé à un nombre d'épis élevé, un poids d'épis important et un cycle végétatif court à intermédiaire, une hauteur moyenne. Ces génotypes pourraient constituer une base solide pour des programmes de sélection visant à améliorer la productivité en conditions semi-arides.

L'évaluation de la tolérance au stress hydrique (Chapitre 2) a confirmé l'effet dépressif du PEG-6000 sur la germination et la croissance précoce, tout en identifiant des génotypes résilients. L21, L28, L13 et L16 ont démontré une vigueur germinative et une croissance racinaire maintenues sous stress osmotique, les positionnant comme candidats idéaux pour développer des variétés tolérantes à la sécheresse. Notamment, L28 émerge comme un génotype doublement intéressant, alliant bon rendement (Chapitre 1) et résistance au stress hydrique (Chapitre 2), ce qui en fait un matériel génétique précieux pour les régions arides.

Enfin, l'étude des propriétés technologiques (Chapitre 3) a permis de classer les génotypes en trois groupes, avec un focus particulier sur le groupe G3 (L3, L4, L5, L6, L7, L8, L9, L11, L12, L13, L14, L18, L19, L23, L24, L26 et T4), présentant une qualité technologique moyenne à élevée. Certains génotypes comme L13, L18 et L26 combinent une bonne adaptabilité agronomique (Chapitre 1) et des caractéristiques technologiques favorables, tandis que L13 montre également une tolérance au stress précoce (Chapitre 2), illustrant le potentiel de sélection multi-critères.

Ces résultats soulignent l'importance d'une approche intégrée combinant :

- La sélection de génotypes performants (L28, L18, L13) pour leur rendement et leur stabilité en conditions variables,
- L'incorporation de traits de tolérance au stress hydrique (L21, L16) dès les stades précoces,

- L'optimisation de la qualité technologique via des génotypes comme ceux du groupe G3, notamment L18 et L13, déjà identifiés pour d'autres traits avantageux.

Pour renforcer ces résultats, plusieurs perspectives de recherche se dégagent : (1) valider la stabilité des génotypes prometteurs à travers des essais multi-environnementaux, (2) approfondir les mécanismes de tolérance par des analyses physiologiques et biochimiques (stress oxydatif, métabolisme des sucres, lipides), (3) exploiter les outils biotechnologiques (marqueurs moléculaires, génomique) pour identifier les déterminants génétiques de l'adaptation, et (4) affiner la sélection qualité par l'étude approfondie des propriétés technologiques (amidon, gluten, rhéologie de la pâte). Cette approche intégrée permettrait d'accélérer le développement de variétés performantes et adaptées aux conditions semi-arides.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- Ababaei, B., & Chenu, K. (2020).** Heat shocks increasingly impede grain filling but have little effect on grain setting across the Australian wheat belt. *Agr. Forest. Meteorol*, 284, 107889.
- Abdellaoui, Z., (2007).** Etude de l'effet de la fertilisation azotée sur les propriétés Techno-fonctionnelles des protéines de blé. Thèse de doctorat en sciences, Institut National Agronomique El Harrach. 131p.
- Abdolshahi, R., Nazari, M., Safarian, A., Sadathossini, T.S., Salarpour, M., & Amiri, H. (2015).** Integrated selection criteria for drought tolerance in wheat (*Triticum aestivum L.*) breeding programs using discriminant analysis. *Field crops Res*, 174, 20-29.
- Abeledo, L.G., Savin, R., Gustavo, A., & Slafer, G. (2008).** Wheat productivity in the Mediterranean Ebro valley: Analyzing the gap between attainable potential yield with a simulation model. *European Journal of Agronomy*, 28, 541-550.
- Acquaah, G. (2012).** Principles of plant genetics and breeding. Second edition. John Wiley and Sons, Ltd, Chichester. UK. 740 p.
- Adams, J.C., & Farrish, K.W. (1992).** Seedcoat removal increases speed and completeness of germination of water oak. Tree planters' notes- US Department of Agriculture, Forest Service (USA).
- Adhiena, M., Wassu, M., & Taddesse, D. (2016).** Estimation of heritability and genetic advance of yield and yield related traits in bread wheat (*Triticum aestivum L.*) genotypes at Ofla District, Northern Ethiopia. *International Journal of Plant Breeding and Genetics*, 10(1), 31-37.
- Ahmad, M., Akram, Z., Munir, M.,& Rauf , M.(2006).** Physio-morphic response of wheat genotypes under rainfed conditions. *Pak J Bot*, 38(5), 1697-1702.
- Ahmed, H.G.M.D., Zeng, Y., Shah, A.N., Yar, M.M., Ullah, A., & Ali, M. (2022).** Conferring of drought tolerance in wheat (*Triticum aestivum L.*) genotypes using seedling indices.
- Ahmed, H.G.M.D., Zeng, Y., Shah, A.N., Yar, M.M., Ullah, A., & Ali, M. (2022).** Conferring of drought tolerance in wheat (*Triticum aestivum L.*) genotypes using seedling indices. *Front. Plant Sci*, 13:961049.
- Ahmed, H.G.M-D., Sajjad, M., Li, M., Azmat, M.A., Rizwan, M., Maqsood, R. H. (2019).** Selection criteria for drought -tolerant bread wheat genotypes at seedling stage. *Sustainability*, 11, 2584.
- Ahmed, K., Shabbir, G., Ahmed, M., & Shah, K.N.(2020).** Phenotyping for drought resistance in bread wheat using physiological and biochemical traits. *Science of the total environnement*, 729,139082.

- Akcura, M., & Ceri, S. (2011).** Evaluation of drought tolerance indices for selection of Turkish oat (*Avena sativa L.*) landraces under various environmental conditions. *Zemdirbyste-Agriculture*, 98(2), 157-166.
- Akcura, M. (2009).** Genetic variability and interrelationship among grain yield and some quality traits in Turkish winter durum wheat landraces. *Turk J Agric For*, 33, 547-556.
- Akram, Z., Ajmal, S.U., & Munir, M. (2008).** Estimation of correlation coefficient among some yield parameters of wheat under rainfed conditions. *Pak. J. Bot*, 40(4), 1777-1781.
- Alais, C., Linden, G., & Miclo, L. (2008).** *Biochimie alimentaire* (pp. 260-p). Dunod.
- Alam, H., Khattak, J.Z.K., & Ksiksi, T.S. (2020).** Comparative effects of NaCl and polyethylene glycol on seed germination of four native species for landscaping under arid environment. *Sarhad Journal of Agriculture*, 36(2), 374-733.
- Alberts, M.J.A., (2004).** A comparison of statistical methods to describe genotype * environment interaction and yield stability in multilocation maize trials. Plant breeding MSc thesis. University of the free state Bloemfontein. Pp100.
- Aldovrandi, L., & F. Vitali. (1995).** Criteri di valutazione del frumento tenero de parte dell'industria molitoria. *Molini d'Italia*, 46(3): 16-19.
- Alem, C., Labhilili, M., Brahmi, K., Jlibene, M., Nasrallah, N., & Filali-Maltouf, A. (2002).** Adaptations hydrique et photosynthétique du blé dur et du blé tendre au stress salin. *C.R. Biologies*, 325, 1097-1109.
- Ali, A.H., & Shakor, E.F. (2012).** Heritability, variability, genetic correlation and path analysis for quantitative traits in durum and bread wheat under dry farming conditions. *Mesopotamia J. of Agri*, 40(4), 27-39.
- Ali, Y., Atta, B.M., Akhter, J., Monneveux, P., & Lateef, Z. (2008).** Genetic variability, association and diversity studies in wheat (*Triticum aestivum L.*) germplasm. *Pak. J. Bot*, 40(5), 2087-2097.
- Al-Issawi, M., Rihan, H., El-Sarkassy, N., Fuller, M. (2012).** Frost hardiness expression and characterization in wheat at ear emergence. *J. Agron, Crop Sci*, 199, 66-74.
- Almaghrabi, O.A. (2012).** Impact of drought stress on germination and seedling growth parameters of some wheat cultivars. *Life science journal*, 9(1), 590-598.
- Almeselmani, M., Deshmukh, P.S., Sairam, R.K., Kushwaha, S.R. & Singh T.P. (2006).** Protective role of antioxidant enzymes under high temperature stress. *Plant Sci*, 171, 382-388.

- Altaf, A., Gull, S., Zhu, X., Zhu, M., Rasool, G., Ibrahim, M.E.H., & Chen, L. (2021).** Study of the effect of PEG-6000 imposed drought stress on wheat (*Triticum aestivum L.*) cultivars using relative water content (RWC) and proline content analysis. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 58(1).
- Al-Taisan, W.A. (2010).** Comparative effects of drought and salt stress on germination and seedling growth of *Pennisetum divisum* (Gmel) Henr'. *American journal of Applied sciences*, 7(5), 640-646.
- AOSA & SCST (1993).** Rules for testing seeds. *Journal of Seed Technology*, 16, 1-113.
- Araus, J.L., & Cairns, J.E. (2014).** Field high –throughput phenotyping: the new crop breeding frontier. *Trends in Plant Sci*, 19(1), 52-61.
- Aremu, O. (2012).** Exploring statistical tools in measuring genetic diversity for crop improvement, genetic diversity in plants, Prof. Mahmut Caliskan (Ed.), and ISBN: 978-953-51-0185-7.
- Arya, V.K., Singh, J., & Kumar, L. (2017).** Character association and path coefficient analysis in wheat (*Triticum aestivum L.*). *Indian Journal of Agricultural Research*, 51(3), 128-134.
- Asfere, Y., Zenabu, D., Kassahu, E., Adam, A., Kebede, A., Gasha, A., Dida, A., Atlaw, A., Tefera, B., & Wolore, T. (2020).** In-vitro screening of selected accessions of wheat (*Triticum aestivum L.*) variety for drought tolerance in Ethiopia. *Journal of Plant Sciences*, 8(5), 123-133.
- Ashfaq, M., Khan, A.S., & Ali, Z. (2003).** Association of morphological traits with grain yield in wheat (*Triticum aestivum L.*) *Int.J. Agric.Biol*, 5, 264-267.
- Asif, M., Asim, M., Mujahid, M.Y., Mustafa, S.Z., Kisana, N., & Ahmed, Z. (2003).** Analysis of wheat genotypes for yield stability in rainfed environments. *Pakistan J Biol Sci*, 6(17), 1509-1511.
- Atwell, W., & Finnie, S. (2016).** *Wheat flour*. Elsevier
- Awan, S.I., Ahmad, S.D., Ali, M.A., Ahmed, M.S., & Rao, A. (2015).** Use of multivariate analysis in determining characteristics for grain yield selection in wheat. *Sarhad Journal of Agriculture*, 31(2), 139-150.
- Ayalew, H., Liu, H., Borner, A., Kobiljski, B., Liu, C., & Yan, G. (2018).** Genome-wide association mapping of major root length trait QTLs under PEG-induced water stress in wheat. *Front. Plant Sci*, 9, 1-9.
- Ayed, S., Othmani, A., Bouhaouel, I., & Teixeira da Silva, J.A. (2021).** Multi-environment screening of durum wheat genotypes for drought tolerance in changing climatic events. *Agronomy*, 11(5), 875.

- Azizi, M.H., Seyedin, S. & Peyghambaroust, S.H. (2006).** Effect of flour extraction rate on flour composition, dough rheological characteristics and quality of flat bread. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 8,323-330
- Bahlouli, F., Bouzerzour, H., Benmahammed, A., & Hassous, K.L. (2005).** Selection of high yielding and risk efficient durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivars under semi-arid conditions. *Agronomy Journal*, 4,360-365.
- Bajji, M., Lutts, S., & 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.
- Bala, P., & Sikder, S. (2017).** Evaluation of heat tolerance of wheat genotypes through membrane thermostability test. *MAYFEB J.Agr. Sci*, 2, 1-6.
- Balla, K., Rakszegi, M., Bekes, F., Bencze, S., & Veisz, O. (2011).** Quality of winter wheat in relation to heat and drought shock after anthesis. *Czech Journal of food science*, 29(2), 117-128.
- Baloch, M.J., Dunwell, J., Khakwani, A.A., Dennett, M., Jatoi, W.A., & Channa, S.A. (2012).** Assessment of wheat cultivars for drought tolerance via osmotic stress imposed at early seedling growth stages. *Journal of agricultural research*, 50(3), 299-310.
- Bayissa, T., Mengistu, G., Gerema, G., Balcha, U., Feyisa, H., Kedir, A., Legese, Z., Asegid, D., Leta, T., & Jobe, T. (2023).** Genotype * environment interaction of lowland bread wheat varieties for irrigation in diffrenet areas of Oromia. *Journal of Plant Environment Interactions*, 4(2), 10.
- Bekkis, S., Benmehaia, A.M., & Kaci, A. (2022).** Les enjeux de la dépendance de la filière de blé en Algérie : Analyse par asymétries de réponses de l'offre dans la chaîne de valeur. *New Medit* , 1,
- Belaid, D. (2015).** Le semis- direct, une opportunité de développement. Communication au séminaire internationale « Systèmes de Production en Zones Semi-Arides. Diversité Agronomique et Système de Cultures ». Université Mohamed Boudiaf, M'sila. 04 et 05 Novembre, 6p.
- Belderok, B., Mesdag, H., & Donner, D.A. (2000).** Bread- Making Quality of Wheat. Springer, New York.
- Benbelkacem, A. (2000).** Evaluation du progrès génétique chez quelques variétés de blé dur (*Triticum turgidum* L. var *durum*) cultivées en Algérie. *Options méditerranéennes*, 6, 105-10.
- Benbelkacem, A. (2022).** Principes d'amélioration des plantes : stratégie de sélection variétale des céréales en Algérie. Journée scientifique sur la connaissance et le savoir, 16-17 Mai 2022, Faculté SNV-STU & LCVRN, Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi Bordj Bou Arréridj.
- Bencharif, A., Tozanli, S., le meilleur, S.(2009).** Dynamique des acteurs dans les filières agronomiques et agroalimentaires. *Options Méditerranéennes*, B 64, perspectives des politiques agricoles en Afrique du Nord, pp 94-142.

- Bendada, H. (2021).** Contribution à la sélection de l'adaptation de quelques génotypes d'orge (*Hordeum vulgare L.*) dans les conditions agro-climatiques semi-arides de la région de Sétif. *Thèse de doctorat en sciences, Univ. Mohamed Boudiaf M'sila*, 152 p.
- Benderradji L., Hadji N., Kellou K., Benniou, R. & Brini F. (2016).** Effet du NaCl et PEG 6000 sur le comportement morpho-physiologique et biochimique des variétés de blé dur et tendre cultivées *in vitro* en milieu hydroponique. *Revue Agriculture* 1, 278-286.
- Benniou, R., & Aubry, C. (2012).** Farm diversity and crop growing practices in semi-arid regions: A case study of the Setif high plains in Algeria. *African Journal of Agricultural Research*, 7(48), 6363-6375.
- Beres, B.L., Rahmani, E., Clarke, J.M. Grassini, P., Pozniak, C.J., Geddes, C.M., Porker, K.D., May, W.E., & Ransom, J.K. (2020).** A systematic review on durum wheat: enhancing production systems by exploring genotype, environment, and management (G*E*M) synergies. *Front Plant Sci*, 11, 568657.
- Bibi, A., Sadaqat, H.A., Tahir, M.H.N., & Akram, M.H. (2012).** Screening of sorghum (*Sorghum bicolor* var. Moench) for drought tolerance at seedling stage in polyethylene glycol. *The J. Animal and plant sci*, 22(3), 671-678.
- Bicar, E.H, Woodman-Clikeman, W., Sangtong, V., Peterson, J.M., Yang, S.S., Lee, M, & Scott, M.P. (2008).** *Transgenic Res.* 17: 59–71
- Birhanu, M., Sentayehu, A., Alemayehu, A., Ermias, & Dargicho, D. (2016).** Genetic diversity based on multivariate analyses for yield and its contributing characters in bread wheat (*Triticum aestivum L.*) genotypes. *Agricultural research and technology*, 8(5).
- Bolot, S., Abrouk, M., Masood-Quraishi, U., Stein, N., Messing, J., Feuillet, C., & Salse, J. (2009).** The “inner circle” of the cereal genomes. *Current opinion in plant biology* 12(2), 119-125.
- Bordes, J., Branlard, G., Oury, F. X., Charmet, G., & Balfourier, F. (2008).** Agronomic characteristics, grain quality and flour rheology of 372 bread wheats in a worldwide core collection. *Journal of cereal science*, 48(3), 569-579.
- Boudreau, A., & Ménard, G. (Eds.). (1992).** *Le Blé: éléments fondamentaux et transformation.* Presses Université Laval.
- Boukid, F., Folloni, S., Ranieri, R., & Vittadini, E. (2018).** A compendium of wheat germ: Separation, stabilization and food applications. *Trends in Food Science and Technology*, 78,120-133.
- Bouthiba, A., Debaeke, P., & Hamoudi, S.A. (2008).** Varietal differences in the response of durum wheat (*Triticum turgidum L. var durum*) to irrigation strategies in a semi-arid region of Algeria. *Irrigation science*, 26(3), 239-251.

- Branger, A., Richer, M. M., & Roustel, S. (2007).** *Alimentation et processus technologiques*. Educagri Editions.
- Brown, K. H. (1991).** The importance of dietary quality versus quantity for weanlings in less developed countries: a framework for discussion. *Food and Nutrition Bulletin*, 13(2), 1-9.
- Burns, D.A., & Ciurczak, E.W. (2007).** Handbook of Near-Infrared Analysis. CRC Press. Baton Rouge.
- Bushuk, W. (1986).** Wheat: chemistry and uses. *Cereal Foods World*, 31, (3): 218-226.
- Bushuk, W., & Békés, F.(2002).**Contribution of protein to flour quality.In : Salgo, A. Tomoskozi,S.,Lasztity,R.(eds),Proc.Novel Raw Materials, Technologies and Products – New challenge for the quality control.ICC, Vienna,Austria,pp4-9.
- Calvel, R. (1980).** La panification : pâte, fermentation, mise en forme. La boulangerie moderne, Paris, EYROLLES, pp. 112-142.
- Campbell, G.M. (2007).** Roller milling of wheat. *Handbook of Powder Technology*, 12, 383-419.
- Cappelli, A., Cini, E., Guerrini, L., Masella, P., Angeloni, G., & Parenti, A. (2018).** Predictive models of the rheological properties and optimal water content in doughs: An application to ancient grain flours with different degrees of refining. *Journal of Cereal Science*, 83, 229-235.
- Cauvain, S.P., & Young, L.S.(2009).** The ICC handbook of cereals flour, dough and product testing: Methods and application. Lancaster, PA: DEStech Publications Inc.
- Chabane, M., & Boussard, J.M. (2012).** La production céréalière en Algérie : des réalités d’aujourd’hui aux perspectives stratégiques de demain. 20 pp. Hal-02804678.
- Chaib, G., Benlaribi, M., & Hamzoune, T. (2015).** Accumulation d’osmoticums chez le blé dur (*Triticum durum Desf.*) sous stress hydrique. *European Scientific Journal*, 11, 24.
- Chehili, F., Boudour, L., & Bouchtab, K. (2017).** Etude de la variabilité agronomique et biochimique des quatre géotypes d’une variété de blé dur cultivé en Algérie (*Triticum durum Desf.*). *European Scientific Journal*, 13, 9.
- Chen, Y., Palta, J., Prasad, P.V., & Siddique, K.H.M. (2020).** Phenotypic variability in bread wheat root systems at the early vegetative stage. *Plant biology*, 20,
- Chennafi, H., Aidaoui, A., Bouzerzour, H., & Saci, A. (2006).** Yield response of durum wheat (*Triticum durum Desf.*) cultivar Waha to deficit irrigation under semi-arid growth conditions. *Asian journal of plant sciences*. 5(5), 584-860.
- Cheriet G. (2000).** Etude de la galette : différents types, recette et mode de préparation. Thèse de magister, INATAA. Université de Constantine, 99 p.

Chowdhury, M.K., Hasan, M.A., Bhadur, M.M., Islam, M., Hakim, M., Iqbal, M.A., & Islam, M.S.(2021). Evaluation of drought tolerance of some wheat (*Triticum aestivum L.*) genotypes through phenology, growth, and physiological indices. *Agronomy*, 11(9), 1792.

Chung, O. K., & Ohm, J. B. (1996). Effect of genotype and environment on gluten characteristics and their relationships with baking characteristics of hard winter wheats. In *Cereal Foods World Abstr* (Vol. 41, pp. 579-580).

CIC (2021). Conseil International des Céréales. <https://www.igc.int/fr/>

Conti, V., Roncallo, P.F., Beaufort, V., Cervigni, G.L., Miranda, R. & Jensen C.A. (2011). Mapping of main and epistatic effect QTLs associated to grain protein and gluten strength using a RIL population of durum wheat. *J. Appl. Genet.*52(3), 287-298.

Cornell, H. (2003). In: Cauvain SP (ed) Bread Making: Improving Quality. Woodhead Publishing, Cambridge

Czaja, T., Sobota, A., & Szostak, R. (2020). Quantification of ash and moisture in wheat flour by Raman spectroscopy. *Foods*, 9(3), 280.

Dabi, A., Mekbib, F., & Desalegn, T., (2019). Genetic variability studies on bread wheat (*Triticum aestivum L.*) genotypes. *Journal of plant breeding and crop science*, 11(2), 41-54.

Daniels, N. W. R., Frazier, P. J. & Wood, P. S. (1971). Flour lipids and dough development. *Bakers Digest*,45(4), 20.

Debition, C. (2010). Identification des critères du grain de blé (*Triticum aestivum L.*) favorables à la production de bioéthanol par l'étude d'un ensemble de cultivars et par l'analyse protéomique de lignées isogéniqueswaxy. Thèse de Doctorat, *Université Blaise Pascal*, Clermont-Ferrand, France.

Dejonckheere, A. (2023). Etude de l'effet de la densité de semis et du choix variétal sur le développement végétal et les composantes de rendement du froment d'hiver (*Triticum aestivum L.*), *Mémoire de Master en sciences agronomiques, LIEGE université Gembloux Agro-Bio- Tech* .

Del Pozo, A., Matus, I., Serret, M.D., & Araus, J.L. (2014). Agronomic and physiological traits associated with breeding advances of wheat under high productive Mediterranean conditions. The case of Chile. *Env. Exp. Bot*, 103, 180-189.

Desheva, G., & Kyosev, B. (2015). Genetic diversity assessment of common winter wheat (*Triticum aestivum L.*) genotypes. *Emir. J. Food Agric*, 27(3), 283-290.

Devesh, P., Moitra, P.K., Shukla, R.S., Shukla, S.S., Pandey, S., & Arya, G. (2018). Analysis of variability , heritability and genetic advance of yield, its components and quality traits in wheat. *International Journal of Agriculture, Environment and Biotechnology*, special issue, 855-859.

Dexter, J.E., & Sarkar, A.K. (2004). Dry milling. WHEAT / dry milling (pp.363-375).

- Dhanda, S.S., Sethi, G.S., & Behl, R.K. (2004).** Indices of drought tolerance in wheat genotypes at early stages of plant growth. *Journal of agronomy and crop science*, 190(1), 6-12.
- Di Silvestro, R., Di Loreto, A., Marotti, I., Bosi, S., Bregola, V., & Gianotti, A. (2014).** Effects of flour storage and heat generated during milling on starch, dietary fiber and polyphenols in stoneground flours from two durum- type wheats. *International Journal of Food Science and Technology*, 49(10), 2230-2236.
- Ding, Z., Ali, E.F., Elmahdy, A.M., Ragab, K.E., Seleiman, M.F., Kheir, A.M.S. (2021).** Modelling the combined impacts of deficit irrigation, rising temperature, and compost application on wheat yield and water productivity. *Agric. Water Manag.* 244, 106626.
- Djemel, A., Alvarez-Iglesias, L., Pedrol, N., Lopez-Malvar, A., Ordas, A., & Revilla, P. (2018).** Identification of drought tolerant populations at multi-stage growth phases in temperate maize germplasm. *Euphytica*, 214(8), 1-18.
- Dupont, F.M., Hurkman, W.J., Vensel, W.H., Tanaka, C., Kothari, K.M., Chung, O.K., et al., (2006).** Protein accumulation and composition in wheat grains: effects of mineral nutrients and high temperature. *Eur. J.Agron*, 25, 96-107.
- Dusenge, M.E., Duarte, A.G., & Way, D.A. (2019).** Plant carbon metabolism and climate change: elevated CO₂ and temperature impacts on photosynthesis, photorespiration and respiration. *New Phytol*, 221, 32-49.
- Edwards, M. (2010).** Morphological features of wheat grain and genotype affecting flour yield. Australia. PhD Thesis, Southern Cross University, Lismore, NSW.
- Ellis, R.H., & Roberts, E.H. (1981).** The quantification of ageing and survival in orthodox seeds. *Seed science and technology*, 9, 373-409.
- El-Porai, E.S., Salama, A.E., Sharaf, A.M., Hegazy, A.I., & Gadallah, M.G.E. (2013).** Effect of different milling processes on Egyptian wheat flour properties and pan bread quality. *Annals of Agricultural Science*, 58(1), 51-59.
- Emillie. (2007).** Connaissance des aliments Base alimentaire et nutritionnelles de la diététique. ED : Tec et Doc, Lavoisier, paris.
- Eshun, G. (2012).** Nutrient composition and functional properties of bean flours of three soya bean varieties from Ghana. *African Journal of Food Science and Technology*, 3(8), 176-181.
- Evers, T. & Millar, S. (2002).** Cereal grain structure and development: some implication for quality. *Journal of Cereal Science*, 36 : 261-284.

- Faisal, S., Mujtaba, S.M., Khan, M.A., & Mahboob, W.A.J.I.D. (2017).** Morpho-physiological assessment of wheat (*Triticum aestivum L.*) genotypes for drought stress tolerance at seedling stage. *Pak. J. Bot*, 48 (2), 445-452.
- Farid, M., Anshori, M.F., Musa, Y., Iswoyo, H., & Sakinah, A.I. (2021).** Interaction of rice salinity screening in germination and seedling phase through selection index based on principal components. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 8(3), 368-377.
- Faridi, H., & Rasper, F.(1987).** The alveograph handbook.
- Feliachi, K. (2000).** Programme de développement de la céréaliculture en Algérie. In proc. Symposium blé 2000, enjeux et stratégie Algérie 21-27.
- Fellahi, Z. (2017).** Analyse génétique d'un croisement line x testeur, réponse à la sélection et tolérance des stress du blé tendre (*Triticum aestivum L.*) sous condition semi-aride, thèse de doctorat en science, *Univ. Ferhat Abbas Sétif 1*, 227p.
- Fellahi, Z.E.A., Zaghdoudi, H., Bensaadi, H., Boutalbi, W., & Hannachi, A.(2019).** Assessment of salt stress effect on wheat (*Triticum aestivum L.*) cultivars at seedling stage. *Agriculturae Conspectus Scientificus*, 84(4), 347-355.
- Fernandez, G.C.J. (1992).** Effective selection criteria for assessing stress tolerance. In: Kuo, C.G. (Ed), Proceedings of The International Symposium on Adaptation of Vegetables and Other Food Crops in Temperature and Water Stress, Publication. Tainan.Taiwan.
- Feuillet, P. (2000).** Le grain de blé composition et utilisation. *INRA*, Paris,308.
- Ficco, D.B.M., De Simone, V., De Leonardis, A.M., Giovanniello, V., Del Nobile, M.A., & Padalino, L. (2016).** Use of purple durum wheat to produce naturally functional fresh and dry pasta. *Food Chemistry*, 205, 187-195.
- Fido, R.J. Békés, F., Gras, P.W., & Tatham, A.S. (1997).** Effects of α -, β -, γ - and ω - gliadins on the dough mixing properties of wheat flour. *Journal of cereal science*, 26(3), 271-277.
- Fleury, D., Jefferies, S., Kuchel, H., & Langridge, P. (2010).** Genetic and genomic tools to improve drought tolerance in wheat. *J.Exp. Bot*, 61, 3211-3222.
- Fras, A., Wisniewska, M., Golebiewski, D. (2020).** Estimation of technological value and chemical composition of selected common wheat cultivars (*Triticum aestivum L.*). *Plant Breeding and Seed Science*,81.
- Frederiks, T.M., Christophet, J.T., Borrell, A.K. (2008).** Low temperature adaptation of wheat post head- emergence in northern Australia. In: Apples, R., Eastwood, R., Lagudah, E., Langridge,

P., Mackay- Lynne, M. (Eds.), The 11 th International Wheat Genetics Symposium Proceedings. Sydney University Press.

Garg, M., Sharma, A., Vats, S., Tiwari, V., Kumari, A., Mishra, V. (2021). Vitamins in cereals: a critical review of content, health effects, processing losses, bioaccessibility, fortification and biofortification strategies for their improvement. *Front Nutr*, 8, 586815.

Geneti, G.S., Kebede, S.A., & Mekonnen, T.B. (2022). Genetic variability and association of traits in bread wheat (*Triticum aestivum L.*) genotypes in Gechi District, South West Ethiopia. *Advances in agriculture*,

Gerard, G.S., Crespo-Herrera, L.A., Crossa, J., Mondal, S., Velu, G., Philomin, J., Huerta Espino, J., Vergas, M., Rhandawa, M.S., Bhavani, S., Braun, H., & Singh, R.P. (2020). Grain yield genetic gains and changes in physiological related traits for CIMMYT's high rainfall wheat screening nursery tested across international environments. *Field Crops Res*, 249, 107742.

Ghanifathi, T., Valizadeh, M., Shahryari, R., Shahbazi, H., & Mollasadeghi, V. (2011). Effect of drought stress on germination indices and seedling growth of 12 bread wheat genotypes. *Advances in Environmental Biology*, 5(6), 1034-1039.

Gholamin, R. & Khayatnezhad, M. (2010). Effect of polyethylene glycol and NaCl stress on two cultivars of wheat *Triticum durum* at germination and early seedling stages. *American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Sciences*, 9, 86-90.

Gianibelli, M.C., Laroque, O.R., & MacRitchie, F. (2001). Biochemical, genetic and molecular characterization of wheat glutenin and its components subunits. *Cereal Chemistry*, 78, 635-646.

Githinji, G.G., Kinyua, M., Kiplagat, O., & Birithia, R. (2016). Evaluation of drought tolerance in mutant Kenyan bread wheat (*Triticum aestivum L.*) using in vitro techniques. *International Journal of Agronomy and Agricultural Research*, 9(2), 180-189.

Godon, B. (1982). Valeur meunière et boulangère des blés tendres et de leurs farines : conservation et stockage des grains et produits dérivés céréales, oléagineuse protéagineux aliments pour animaux, p. 1009-1028.

Godon, B. (1995). Le pain. Pour la science. Dossier hors-série de mars (science et gastronomie), pp : 16-25

Grote, U., Fasse, A., Nguyen, T.T., & Erenstein, O. (2021). Food security and the dynamics of wheat and maize value chains in Africa and Asia . *Front. Sustain. Food Syst*, 4, 317.

Guo, R.W., & Gong, H.D. (2012). Effects of water stress on germination and growth of Linseed seedlings (*Linum usitatissimum L.*). Photosynthetic efficiency and accumulation of metabolites. *Journal of Agricultural Science*, 4(10), 253-265.

- Hamer, R.J., & van Vliet, T. (2000).** Understanding the structure and properties of gluten: An overview. In Shewry P.R., Tatham, A.S. (eds): wheat gluten Proceedings of the 7th International Workshop Gluten 2000. April 2-6, 2000, Bristol, UK: 125-131.
- Hammam, K.A. & Khaled, G.A. (2009).** Stability of wheat genotypes under different environments and their evaluation under sowing dates and nitrogen fertilizer levels. *Aus. J. Basic and App.Sci* ,3(1), 206-217.
- Han, X. Z., Benmoussa, M., Gray, J. A., BeMiller, J. N., & Hamaker, B. R. (2005).** "Detection of proteins in starch granule channels." *Cereal Chemistry*, 82(4), 351-355.
- Hannachi, A., Fellahi, Z.E.A., Bouzerzour, H., & Boutekrabt, A.(2013).** Diallel-cross analysis of grain yield and stress tolerance-related traits under semi-arid conditions in Durum Wheat (*Triticum durum Desf.*) . *Electronic journal of plant breeding*, 4(1): 1027-1033.
- Haraszi, R., Gras, P. W., Tömösközi, S., Salgo, A., & Bekes, F. (2004).** Application of a micro Z- arm mixer to characterize mixing properties and water absorption of wheat flour. *Cereal chemistry*, 81(5), 555-560.
- Hassan, M.S., Ali, M.A., & Hussein, S.A. (2022).** Performance and stability of some bread wheat genotypes for grain yield and some attributes in response to drought stress. *International Journal of Agricultural Sciences*,4(1),236-253.
- Hefny, Y.A.M., Mohamed, N.E., Abdelraoof, A.O., & Sleem, H.A. (2020).** Germination parameters of some bread wheat genotypes under drought stress conditions. *SVU- International Journal of Agricultural Science*, 2(2), 226-241.
- Hemery, Y., Holopainen, U., Lampi, A. M., Lehtinen, P., Nurmi, T., Piironen, V., & Rouau, X. (2011).** Potential of dry fractionation of wheat bran for the development of food ingredients, part II: Electrostatic separation of particles. *Journal of Cereal Science*, 53(1), 9-18.
- Hernandez, V.A.G., Cruz, E.L. Onofre, L.E.M., Varela, A.S., Espinosa, M.A.G., & Garcia, F.Z.(2021).**Maize (*Zea mays* L.) landraces classified by drought stress tolerance at the seedling stage . *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 33(1), 29-36.
- Hoseney, R. C. (1986).** "Structure of cereal", in R. C. Hoseney, (ed.), *Principles of Cereal Sciences and Technology*. St Paul, MN, pp. 1-33.
- Hossain, M., Azad, A.K., Alam, S., & Eaton, T.E. (2021).** Estimation of variability, Heritability and genetic advance for phenological, physiological and yield contributing attributes in wheat genotypes under heat stress condition. *American journal of plant sciences*, 12,586-602.
- Iqbal, J. (2019).** Morphological, Physiological and molecular markers for the adaptation of wheat in drought condition. *Asian Journal of Biotechnology and Genetic Engineering*, pp .1-13.

- Iqbal, M., Raja, N.I., Yasmeen, F., Hussain, M., Ejaz, M., & Shah, M.A. (2017).** Impacts of Heat Stress on Wheat: A Critical Review. *Advances in Crop Science and Technology*, 5(1), 1-9.
- ISTA (2008).** International Seed Testing Association; Zurich. International rules for seed testing.
- Jain, M., Mittal, M., & Gadre, R. (2013).** Effect of PEG-6000 imposed water deficit on chlorophyll metabolism in maize leaves. *Journal of stress physiology and biochemistry*, 9 (3), 262-271.
- Jatoi, W.A., Baloch, M.J., Kumbhar, M.B., Khan, N.U., & Kerio, M.I. (2011).** Effect of water
- Jiang, D., Cao, W. X., Dai, T. B., & Jing, Q. (2003).** "Activities of key enzymes for starch synthesis in relation to growth of superior and inferior grains on winter wheat (*Triticum aestivum* L.) Spike." *Plant Growth Regulation*, 41(3), 247-257.
- Jiao, S.Y., Li, Y.O., Shayila, S.H., & Chen, X.L. (2009).** Seeds germination and seedling growth about three Pennisetum grasses under drought stress. *Acta Bot. Boreal. Occident. Sin*, 29(2), 308-313.
- Johnson, H.W., Robinson, H.F., & Comstock, R.E. (1955).** Estimates of genetic and environmental variability in soybeans 1. *Agronomy Journal*, 47(7): 314–318.
- Jones, H.G., Serraj, R., Loveys, B.R., Xiong, L., Wheaton, A., & Price, A.H. (2009).** Thermal infrared imaging of crop canopies for the remote diagnosis and quantification of plant responses to water stress in the field. *Funct plant bio*, 36, 978-989.
- Jones, K.W., & Sanders, D.C. (1987).** The influence of soaking pepper seed in water or potassium salt solutions on germination at three temperatures. *Journal of Seed Technology*, 97-102.
- Kabir,R.,Ahmed,I.,Rehman,A.,Qamar,M.,Intikhab,A.,Rasheed,A.,Zakriya,M.,Muneer,M.A., & Nisa,Z.(2017).**Evaluation of bread wheat genotypes for variability and association among yield and yield related traits. *International Journal of Biosciences*.11(1),7-14.
- Kajla, M., Yadav, V.K., Khokhar, J., Singh, S., Chhokar, R.S, Meena, R.P., & Sharma, R.K. (2015).** Increase in wheat production through management of abiotic stresses. A review. *Journal of Applied and Natural Science*, 7(2), 1070-1080.
- Kapoor, D., Bhardwaj, S., Landi, M., Sharma, A., Ramarkrishnan, M., & Sharma, A. (2020).** The impact of drought in plant metabolism: how to exploit tolerance mechanisms to increase crop production. *Appl.Sci*, 10 -5692.
- 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
- Karaman, M. (2018).** Evaluation of bread wheat genotypes in irrigated and rainfed conditions using biplot analysis. *Applied Ecology and Environmental Research*,17(1), 1431-1450.

- Karki, P., Subedi, E., Acharya, G., Bashyal, M., Dawadee, N., & Bhattarai, S. (2021).** A review on the effect of heat stress in wheat (*Triticum aestivum* L.) *Archives of Agriculture and Environmental Science*, 6(3), 381-384.
- Karuniawan, A., Maulana, H., Ustari, D., Dewayani, S., Solihin, E., Solihin, M.A., & Arifin, M. (2021).** Yield stability analysis of orange-Fleshed sweet potato in Indonesia using AMMI and GGE biplot. *Heliyon*, 7(4), e06881.
- Katyal, M., Singh, N., & Kaur, S., (2022).** Physicochemical, thermal, and pasting properties of starch separated from various timely sown and delayed sown (Heat Stressed) Wheat of Different Wheat Lines / Variety. *Starch –Starke*, 74, (5-6), 2200003.
- Kaushik, R., Kumar, N., Sihag, M. K., & Ray, A. (2015).** Isolation, characterization of wheat gluten and its regeneration properties. *Journal of food science and technology*, 52(9), 5930-5937.
- Kaya, M.D., Okçu, G., Atak, M., Cikili, Y., & Kolsarici, O. (2006).** Seed treatments to overcome salt and drought stress during germination in sunflower (*Helianthus annuus* L.). *European journal of agronomy*, 24(4), 291-295.
- Kaydan, D., & Yagmur, M. (2008).** Germination, seedling growth and relative water content of shoot in different seed sizes of triticale under osmotic stress of water and NaCl. *African journal of biotechnology*, 7(16), 2862.
- Khalid, A., Hameed, A., & Tahir, M.F. (2023).** Wheat quality: a review on chemical composition, nutritional attributes, grain anatomy, types, classification, and function of seed storage proteins in bread making quality. *Front. Nutr.* 10, 1053196.
- Khan, M.R., Anjum, F.M., Zahoor, T., & Nawaz, H. (2009).** Biochemical and technological characterization of Pakistani spring wheats. *Pakistan Journal of Agricultural Science*, 46(4), 2076-0906.
- Khatibi, A., Omrani, S., Omrani, A., Shojaei, S.H., Mousavi, S.M.N., Illés, A., & Nagy, J. (2022).** Response of Maize Hybrids in Drought- Stress Using Drought Tolerance Indices. *Water*, 14(7), 1012.
- Khatkar, B. S., & Schofield, J.D. (2002).** Dynamic rheology of wheat flour dough.II.Assesment of dough strength and bread making quality. *J Sci Food Agric*, 82,823-826.
- Khatkar, B.S., Bell, A.E., & Schofield, J.D. (1995).**The dynamic rheological properties of glutens and gluten sub-fractions from wheats of good and poor bread making quality.*J Cereal Sci*,22,29-44.

- Khatodia, S., Bhatotia, K., & Behl, R.K. (2019).** Prospects of advanced genomics for development of climate resilient wheat genotypes. *Ekin J.* 5(1), 54-55.
- Khayatnezhad, M., Gholamin, R., Jamaati, S., & Zabihi, R. (2010).** Study of water stress effects on wheat genotypes on germination indexes. *Middle East Journal of Scientific Research*, 6(6), 657-660.
- Kim, H. S., & Huber, K. C. (2008).** "Channels within soft wheat starch A- and B-type granules." *Journal of Cereal Science*, 48(1), 159-172.
- Kim, Y.J., Shanmugasundaram, S.J., Park, H.K., & Park, M.S. (2011).** A simple method of seedling screening for drought tolerance in soybean. *I Korean J crop Sci*, 46, 284-288.
- Kirouani, A., Boukhalfoun, L., Ouldkiar, R., & Bouzerzour, H. (2023).** Analysis of the effect of GE interaction on the grain yield and its related traits in rainfed Algerian durum wheat (*Triticum turgidum* L. var. *durum*) grown in contrasting environments. *Revista facultad nacional de agronomia Medellin*, 76 (2).
- Kizilgeci, F., Tazebay, N., Namli, M., Albayrak, O., & Yildirim, M. (2017).** The drought effect on seed germination and seedling growth in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *International Journal of Agriculture Environment and Food Sciences*, 1(1), 33-37.
- Kleijer, G., Levy, L., Schwaerzel, R., Fossati, D., Brabant, C. (2007).** Relation entre le poids à l'hectolitre et plusieurs paramètres de la qualité dans le blé. *Revue suisse d'agriculture*, 39(6) : 305-309.
- Konik-Rose, Ch., Thistleton, J., Chanvrier, H., Tan, I., Halley, P., Gidley, M., Kosar-Hashemi, B., Wang, H., Larroque, O., Ikea, J., McMaugh, S., Regina, A., Rahman, S., Morell, M., & Li, Z. (2007).** *Theor. Appl. Genet.* 115: 1053–1065.
- Konopka, I., Kozirok, W., Tamska, M. (2005).** Wheat endosperm hardness. Part I. Relationships to colour of kernel cross-section. *Eur. Food Res. Technol.* 220:11–19.
- Kumar, A., Gaurav, S.S., Bahuguna, D.K., Sharma, P., Singh, T., & Chand, P. (2017).** Analysis of variability, heritability and genetic advance for yield and yield related traits in wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes. *International journal of agricultural science and research*, 7(4), 583-590.
- Kweon, M., Slade, L., Levine, H., & Gannon, D. (2014).** Cookie-vs. cracker baking what is the difference? - flour functionality requirements explored by SRC and alveography. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 54(1), 115-138.
- Labuschagne, M.T., Elago, O., & Koen, E. (2009).** Influence of extreme temperatures during grain filling on protein fractions, and its relationship to some quality characteristics in bread, biscuit, and durum wheat. *Cereal Chem*, 86, 61-66.

- Ladoui, K.K., Mefti, M., Benkherbache, N. (2020).** Sélection de génotypes d'orge (*Hordeum vulgare* L.) tolérants au stress hydrique par les indices de tolérance à la sécheresse. *Revue Agrobiologia*, 10(1), 1805-12.
- Lahmar, R., & Ruellan, A. (2007).** Dégradation des sols et stratégies coopératives en Méditerranée : la pression sur les ressources naturelles et les stratégies de développement durable. *Cahiers Agricultures*, 16(4), 318-323.
- Lamara, A., Fellahi, Z., Benguedoudj., S. & Benmahammed, A. (2021).** Appréciation de la qualité technologique d'une collection de blé tendre (*Triticum aestivum* L.) cultivée en Algérie. *Alger. J. biosciences*, 2(1): 019-029.
- Lamara, A., Fellahi, Z.E.A., Hannachi, A., & Benniou, R. (2022).** Assessing the phenotypic variation, heritability and genetic advance in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) candidate lines grown under rainfed semi-arid region of Algeria. *Revista facultad nacional de agronomia Medellin*, 75(3), 10107-10118.
- Langridge, P., & Reynolds, M. (2021).** Breeding for drought and heat tolerance in wheat. *Theoretical and Applied Genetics*, 134(6), 1753-1769.
- Larbi, A., & Mekliche, A. (2004).** Relative water content (RWC) and leaf senescence as screening tools for drought tolerance in wheat. *Options méditerranéennes. Série A, Séminaires méditerranéennes*, 60,193-196.
- Lasme, A.P.H. (2011).** Etude des bases biochimiques et physicochimiques de la valeur meunière du blé tendre à l'aide de lignées quasi-isogéniques pour la dureté. Thèse de doctorat, *Centre International D'études Supérieures en Sciences Agronomiques de Montpellier*.
- Lee, S. H., & BeMiller, J. N. (2008).** "Lysophosphatidylcholine identified as channel-associated phospholipid of maize starch granules." *Cereal Chemistry*, 85(6), 776-779.
- Lesk, C., Rowhani, P., Ramankutty, N. (2016).** Influence of extreme weather disasters on global crop production. *Nature*, 529 (7584), 84-87.
- Lestari, A.P., Sopandie, D., & Aswidinnoor, H. (2019).** Estimation for stress tolerance indices of rice genotypes in low nitrogen condition. *Thai Journal of Agricultural Science*, 52(4), 180-190.
- Li, J., Cui, F., Ding, A.M., Zhao, C.H., Wang, X.Q., & Wang, L. (2012).** QTL detection of seven quality traits in wheat using two related recombinant inbred line populations. *Euphytica* 183(2), 207-226.
- Liu, P., Guo, W., Jiang, Z., Pu, H., Feng, C., & Zhu, X. (2011).** Effects of high temperature after anthesis on starch granules in grains of wheat (*Triticum aestivum* L.). *J. Agric Sci*, 149(2), 159-169.

- Livingston, D.P., Tuong, T.D., Isleib, T.G., & Murphy, J.P. (2016).** Differences between wheat genotypes in damage from freezing temperatures during reproductive growth. *European Journal of Agronomy*, 74, 164-172.
- Madic, M., Paunovic, A., Djurovic, D., Knezevic, D., & Tanaskovic, S. (2012).** Breeding barely (*Hordeum vulgare L.*) for abiotic and biotic limiting factors. In: *Proceedings of the Third International Symposium "Agrosym 2012"*. "Agrosym 2012", Jahorina, Bosnia and Herzegovina, 15-17 November 2012; Faculty of agriculture, University of East Sarajevo: Istočno Sarajevo, Serbia, 2012; pp. 257-262.
- Mahpara, S., Zainab, A., Ullah, R., Kausar, S., Bilal, M., Latif, M.I., & Zuan, A.T.K. (2022).** The impact of PEG-induced drought stress on seed germination and seedling growth of different bread wheat (*Triticum aestivum L.*) genotypes. *Plos one*, 17(2), e0262937.
- Makawi, A.B., Mahmood, M.I., Hassan, H.A.R., Islam, A., & Ahmed, M. (2013).** Grains quality characteristics of local wheat (*Triticum aestivum*) cultivars grown at Khartoum state, Sudan. *International Journal of Life Sciences*, 7(1),12-16.
- Manivannan, P., Jaleel, C.A., Sankar, B., Kishore, K.A. Somasundaram, R., Alagu Lakshmanan, G.M., & Panneerselvam, R. (2007).** Growth, biochemical modifications and proline metabolism in *Helianthus annuus L.* as induced by drought stress. *Colloids Surf. B: Biointerf*, 59, 141-
- Manoj, K., & Uday, D. (2007).** In vitro screening of tomato genotypes for drought resistance using polyethylene glycol. *African Journal of Biotechnology*, 6(6), 691-696.
- Mansouri, A., Oudjehih, B., Benbelkacem, A., Fellahi, Z.E.A., and 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. *International Journal of Agronomy*, volume 2018.
- Maphosa, L., Langridge, P., Taylor, H., Chalmers, K.J., Bennett, D., & Kuchel, H. (2013).** Genetic control of processing quality in a bread wheat mapping population grown in water-limited environments. *J. Cereal Sci.* 57 (3), 304-311.
- Mathew, I., Shimelis, H., Mwadzingeni, L., Zengeni, R., Mutema, M., Chaplot, V. (2018).** Variance components and heritability of traits related to root: shoot biomass allocation and drought tolerance in wheat. *Euphytica*, 214-225.
- Matzke, K., & Riederer, M. (1990).** "The composition of the cutin of the caryopses and leaves of *Triticum aestivum L.*" *Planta*, 182, 461-466.
- McKevith, B. (2004).** Nutritional aspects of cereals. *Nutrition Bulletin*, 29: 111-142.
- Mecha, B., Alamerew, S., Assefa, A., Dutamo, D., & Assefa, E. (2016).** Correlation and path

coefficient studies of yield and yield associated traits in bread wheat (*Triticum aestivum L.*) genotypes. *Adv.Plants. Agric Res*, 6(5), 1-10.

Mekaoussi, R., Rabti, A.B., Fellahi, Z.E.A., Hannachi, A., Benmahammed, A., & Bouzerzour, H. (2021). Assesment of durum wheat (*Triticum durum Desf*) genotypes based on their agro-physiological characteristics and stress tolerance indices. *Acta agriculture Slovenica*, 117(2), 1-16.

Meles, B., Mohammed, W., & Tsehaye, Y. (2017). Genetic variability, correlation and path analysis of yield and grain quality traits in bread wheat (*Triticum aestivum L.*) genotypes at Axum, Northern Ethiopia. *Journal of plant breeding and crop science*, 9(10), 175-185.

Memon, H.M.U., Sial, M.A., & Bux, H. (2022). Evaluation of bread wheat genotypes for water stress tolerance using agronomic traits. *Acta agrobotanica*, 75, 751.

Merouche, A., Debeake, P., Messahel, M., & Kelkouli, M. (2014). Response of durum wheat varieties to water in semi-arid Algeria. *African Journal of Agricultural research*, 9(38), 2880-2893.

Mikhaylenko, G.G., Czuchajowska, Z., Baik, B.K., & Kidwell K.K., (2000). Environmental influences on flour composition, dough rheology, and baking quality of spring wheat. *Cereal Chem*, 77(4), 507-511.

Miric K.V. & Pejcin D.J. (2008). Effects of mill stream flours technological quality on fermentative activity of baker's yeast *Saccharomyces cerevisiae*. *Acta Periodica technologica (Serbia)*, 39,153-159.

Moayedi, A.A., Boyce, A.N., Barakba, S.S., & Ghodsi, M. (2009). The effect of different levels of osmotic stress on germination and seedling growth in promising durum wheat genotypes. *Middle Eastern and Russian Journal of Plant Science and Technology*, 3(1), 10-14.

Mohammadi, N., Mojaddam, M. (2014). The effect of water deficit stress on germination components of grain sorghum cultivars. *Indian Journal of Fundamental and Applied Life Sciences*, 4(4), 289-291.

Mohammadi, R. (2018). Breeding for increased drought tolerance in wheat: a review. *Crop and Pasture Science*, 69(3), 223-241.

Mohammadi, R., & Golkari, S. (2022). Genetic resources for enhancing drought tolerance from a mini-core collection of spring bread wheat (*Triticum aestivum L.*). *Acta Scientiarum Agronomy*, 44.

Mohi-Ud-Din, M., Hossain, M., Rohman, M., Uddin, M., Haque, M., Ahmed, J.U. (2021). Multivariate analysis of morpho-physiological traits reveals differential drought tolerance potential of bread wheat genotypes at the seedling stage. *Plants*, 10,879.

Mollasadeghi, V., & Shahryari, R. (2011). Important morphological markers for improvement of yield in bread wheat. *Advances Environ. Biol*, 5(3), 538-542.

Monneveux, P., & Nemmar, M. (1986). Contribution à l'étude de la résistance à la sécheresse chez le blé tendre (*Triticum aestivum L.*) et chez le blé dur (*Triticum durum Desf.*): étude de

l'accumulation de la proline au cours du cycle de développement. *Agronomie*, 6(6): 583–590.

Mueen-ud-Din G., Salim-ur-Rehman F.M.A., Nawaz H.&Murtaza M.A. (2010). Effect of wheat flour extraction rates on flour composition, farinographic characteristics and sensory perception of sourdough naans. World Academy of Science, Engineering and Technology, *International Journal of Biological, Biomolecular, Agricultural, Food and Biotechnological Engineering*,4(8),668-674.

Muhder, N., Gessese, M.K., & Sorsa, Z. (2020). Assesment of genetic variability among agronomic traits and grain protein content of elite bread wheat (*Triticum aestivum L.*) genotypes in the central highlands of Ethiopia.

Mutlu, A.C.,Boyaci,I.H.,Genis,H.E.,Ozturk,R.,Basaran-Akgul,N.(2011). Prediction of wheat quality parameters using near infrared spectroscopy and artificial neural networks. *Eur Food Res Technol*,

Mutwali, N.I.A.K., 2011. Quality of wheat cultivars grown in different locations of Sudan for bread making. (Ph.D. thesis). Department of food science and technology, Faculty of agriculture, University of Khartoum

Mwadzingeni, L, Shimelis, H., & Tsilo, T.J. (2017). Variance components and heritability of yield and yield components of wheat under drought stressed and non- stressed conditions. *Aust J Crop Sci*, 11, 1425-1430.

Mwadzingeni, L., Shimelis, H., Dube, E., Laing, M.D., & Tsilo, T.J. (2016). Breeding Wheat for Drought Tolerance: Progress and Technologies. *Journal of Integrative Agriculture*, 15(5), 935-943.

Naeem, M.K., Ahmed, M., Noreen, S., Shah, M.K.N., Iqbal, M.S. (2015). Estimation of genetic components for plant growth and physiological traits of wheat (*Triticum aestivum L.*) under normal and stress conditions.*SAARC. J. Agri*,13(1),90-98.

Narayanan, S. (2018). Effects of high temperature stress and traits associated with tolerance in wheat. *Open Access Journal of Science*, 2(3): 177-186.

Nasir, M., Butt, M. S., Anjum, F. M., Sharif, K. A. M. R. A. N., & Minhas, R. (2003). Effect of moisture on the shelf life of wheat flour. *Int. J. Agric. Biol*, 5(4), 458-459.

Nezhadahmadi, A., Prodhon, Z.H. & Faruq, G. (2013). Drought tolerance in wheat. *The Scientific World Journal*, 610721.

Ngwepe, M.R., Shimelis, H., & Mashilo, J. (2021). Estimates of the variance components, heritability and genetic gains of phenotypic traits in citron watermelon (*Citrullus lanatus var. Citroides*). *Plant Breeding*, 140(5), 953-967.

Nouri, A., Etminan, A., Jaime, A., Da Silva, T., & Mohammadi, R. (2011). Assessment of yield, yield-related traits and drought tolerance of durum wheat genotypes (*Triticum turgidum var. durum Desf.*). *Australian Journal of Crop Science*, 5(1), 8-16.

OFAG, (2016). Office fédéral de l'agriculture. Stratégie sélection végétale 2050.Berne.

OFAG, (2017). Instructions de l'office fédéral de l'agriculture relatives à la procédure d'enseignement dans le catalogue des variétés. Berne.

Oikonomou, N. A., Bakalis, S., Rahman, M. S., & Krokida, M. K. (2015). Gluten index for wheat products: Main variables in affecting the value and nonlinear regression model. *International journal of food properties*, 18(1), 1-11.

Osborne, T. B. (1924). The vegetables proteins 2nd edition. Longmans, *Green & Co edition London, England*, 154p.

Othmani, A., Ayed, S., Chamekh, Z., Slama-Ayed, O., Teixeira Da Silva, J.A., Rezgui, M., Slim-Amara, H., & Ben Younes, M. (2021). Screening of seedlings of durum wheat (*Triticum durum Desf.*) cultivars for tolerance to peg induced drought stress. *Pakistan Journal of Botany*, 53, 823-832.

Ozturk, I., Avci, R., Kahraman, T., & Tulek, A., (2021). Physiological parameters of bread wheat (*Triticum aestivum L.*) genotypes and association with yield and quality under rainfed conditions. *Journal of crop breeding and genetics*, 7(1), 52-60.

Padilla-Torres, C.V., Heredia-Olea, E., Serna-Saldivar, S.O., & Lopez- Ahumada, G.A. (2022). Potential of bread wheat (*Triticum aestivum*) affected by the yellow –berry physiological disorder for the production of brewing malts. *Journal of Cereal Science*, 107, 103499.

Pandey, D., Pant, K.R., Bastola, B.R., Giri, R., Bohara, S., Shrestha, S., Hamal, G.B., & Shrestha, J. (2021). Evaluation of bread wheat genotypes under rain-fed conditions in Terai districts of Nepal. *Journal of agriculture and natural resources*, 4(2), 303-315.

Pask, A.J.D., Pietragalla, J., Mullan, D.M., & Reynolds, M.P. (2012). Physiological breeding II: A Field Guide to Wheat Phenotyping. Mexico D. F. CIMMYT. Mexico. 132 p.

Paux, E., Sourdille, P., Salse, J., Saintenac, C., Choulet, F., Leroy, P., Korol, A., Michalak, M., Kianian, S., & Spielmeier, W. (2008). A physical map of the 1 -gigabase bread wheat chromosome 3B. *Science*, 322(5898), 101-104.

Pekmez, H. (2018). Physiochemical characteristics and flourgraph properties of wheat varieties (*Triticum aestivum L.*) used in flat bread (Gaziantep pita). *CyTA – Journal of Food*, 16(1), 965-971.

Piironen, V., & Salmenkallio-Marttila, M. (2009). WHEAT: Chemistry and Technology. *American Association of Cereal Chemists*, 179-222.

Placido, D.F., Campbell, M.T., Folsom, J.J., Cui, X., Kruger, G.R., Baenziger, P.S., & Walia, H.(2013). Introgression of novel traits from a wild wheat relative improves drought adaptation in wheat. *Plant Physiology*, 161(4), 1806-1819.

- Plessis, A., Ravel, C., Bordes, J., Balfourier, F., & Martre, P. (2013).** Association study of wheat grain protein composition reveals that gliadin and glutenin composition are trans-regulated by different chromosome regions. *J.Exp.Bot.*64, 3627-3644.
- Pomeranz, Y. (1988).** Chemical composition of kernel structures. Wheat: *chemistry and technology I*: 97-158.
- Posner, E.S. (2003).** Principles of milling. In B. Caballero, L.C. Trugo & P.M.Finglas (Eds). *Encyclopedia of food science and nutrition* (pp.3980-3986). (2nd ed.). London: Academic Press.
- Pour-Aboughadareh, A., Etminan, A., Abdelrahman, M., Siddique, K.H.M., & Tran, L.S.P. (2020).** Assessment of biochemical and physiological parameters of durum wheat genotypes at the seedling stage during polyethylene glycol-induced water stress. *Plant Growth Regul*, 92, 81-93.
- Pourkheirandish, M., Dai, F., Sakuma, S., Kanamori, H., Distelfeld, A., Willcox, G., et al. (2018).** On the origin of the non-brittle rachis traits of domesticated einkorn wheat. *Front Plant Sci*, 8, 2031.
- Poutanen, K.S., Karlund, A.O., Gomez-Gallego, C., Johansson, D.P., Scheers, N.M., Marklinder, I.M., Eriksen, A.K., Silventoinen, P.C., Nordlund, E., Sozer, N., Hanhineva, K.J., Kolehmainen, M., & Landberg, R. (2022).** Grains – a major sustainable protein for health. *Nutrition Reviews*, 80(6), 1648-1663.
- Pradhan, A., Aher, L., Hegde, V., Jangid, K.K., & Rane, J. (2022).** Cooler canopy leverages sorghum adaptation to drought and heat stress. *Scientific Reports*, 12(1), 1-11.
- Prasad, J., Dashora, A., Chauhan, A., Bangarwa, S.K., & Nesara, K. (2020).** Genetic variability, heritability and genetic advance in bread wheat (*Triticum aestivum L.*) genotypes. *Int.J. Curr. Microbiol. App.Sci*, 9(10), 868-872.
- Qayyum, A., Al Ayoubi, S., Sher, A., Bibi, Y., Ahmad, S., & Shen, Z. (2021).** Improvement in drought tolerance in bread wheat is related to an improvement in osmolyte production, antioxidant enzyme activities, and gaseous exchange. *Saudi J.Biol. Sci*, 28, 5238-5249.
- R Development Core Team (2020).** R: A language and environment for statistical computing. *R Foundation for statistical computing* . Vienna, Austria.<https://www.r-project.org/>
- Rababah, T., Alu'datt, M., Al-Mahasneh, M., Gammoh, S., Al-Obaidy, M., Tha'er Ajouly, V.B.N., (2019).** The effect of different flour extraction rates on physicochemical and rheological characteristics. *Bulg J Agric Sci*, 25(3), 581-588.
- Rabti, A. (2021).** Changement des caractères morpho-physiologiques induit par la sélection artificielle du blé dur (*Triticum durum Desf*) en Algérie. *Thèse de doctorat en sciences , Univ. Ferhat Abbas Sétif 1*, 150 p.

- Rajabi Dehnavi, A., Zahedi, M., Ludwiczak, A., Cardenas Perez, S., & Piernik, A. (2020).** Effect of salinity on seed germination and seedling development of Sorghum (*Sorghum bicolor* L.) genotypes. *Agronomy*, 10(6), 859.
- Ranal, M.A, & Santana, D.G.D. (2006).** How and why to measure the germination process?. *Brazilian journal of botany*, 29, 1-11.
- Rauf, M., Munir, M., Hassan, M., Ahmad, M., & Afzal, M. (2007).** Performance of wheat genotypes under osmotic stress at germination and early seedling growth stage. *African journal of biotechnology*, 6(8), 971-975.
- Raza, A., Khan, K., & Anjum, M.M. (2018).** Evaluation of wheat lines for yield and yield components under rainfed conditions. *Adv Plants Agric Res*, 8(6), 400-404.
- Rebbeck, M.A., Knell, G.R., Hayman, P.T., Lynch, C.W., Alexander, B.M., Faulkner, M., Falconer, D.(2007).** Agronomic practices to reduce frost risk. In D. Reuter (Ed.), *Managing frost risk – A guide for southern Australian grains*. Canberra. ACT: South Australian Research and Development Institute and Grains Research and Development Corporation.
- Regmi, S., Poudel, B., Ojha, B.R., Kharel, R., Joshi, P., Khanal, S., & Kandel, B.P. (2021).** Estimation of genetic parameters of different wheat genotype traits in Chitwan, Nepal. *International Journal of Agronomy*, vol.2021.10 p.
- Reynolds M.P., A. Pellegrineschi B. Skovmand. (2005).** Sink-limitation to yield and biomass: a summary of some investigations in spring wheat. *Annals of Applied Biology* 146(1), 39-49.
- Richards, R.A. (1978).** Variation between and within species of rape seed (*Brassica campestris* and *B napus*) in response to drought stress. 1. Physiological characters. *Aust. J.Agric. Res.*, 29, 491-501.
- Rida, S., Maafi,O., Lopez-Malvar, A., Revilla, P., Riache, M., Djemel, A. (2021).** Genetics of germination and seedling traits under drought stress in a MAGIC population of Maize. *Plants*, 10, 1786.
- Rosell, C.M., & Garzon, R. (2015).** Chemical Composition of Bakery Products. *Handbook of food chemistry*,
- Roudaut, H., Lefrancq, E. (2005).** Alimentation théorique, Série science des aliments , centre régional de documentation pédagogique d'Aquitane. 305 p.
- Ruel, T. (2006).** Document sur la culture du blé. Ed : Educagri, 18p.
- Sabouri, A., Dadras, A.R., Azari, M., Saberi Kouchesfahani, A., Taslimi, M., & Jalalifar, R. (2022).** Screening of rice drought –tolerant lines by introducing a new composite selection index and competitive with multivariate methods. *Scientific Reports*, 12(1), 1-14.

Saglam, A., Terzi, R., Nar, H., Saruhan, N., Ayaz, A.F., & Kadioglu, A. (2010). Inorganic and organic solutes in apoplastic and symplastic spaces contribute to osmotic adjustment during leaf rolling in *Ctenanthe setosa*. *Acta Biologica Cracoviensia Series Botanica*, 52(1), 37-44.

Saleem, B., Khan, A.S., Shahzad, M.T., & Ijaz, F. (2016). Estimation of heritability and genetic advance for various metric traits in seven F₂ populations of bread wheat (*Triticum aestivum L.*). *J.Agr. Sci*, 61(1), 1-9.

Saleh, M.M., Ali, A.W., Alwan, M.H., Suliman, Z.A., Kenaan, R., Daiub, H., & Salem, K.F.M. (2020). Multi – environmental evaluation of wheat tetraploid genotypes for agronomic traits under rainfed conditions in Syria. *Journal of Aridland Agriculture*, (6), 01-05.

Salehi-Lisar, S.Y., & Bakhshayeshan-Agdam, H. (2016). Drought stress in plants: causes, consequences, and tolerance. In: *Drought Stress Tolerance, Plants Proceeding*. Springer, Berlin/Heidelberg, Germany. 16p.

Sanchez-Reinoso, A.D., Ligaretto,-Moreno, G.A., & Rastrepo-Diaz, H. (2020). Evaluation of drought indices to identify tolerant genotypes in common bean bush (*Phaseolus vulgaris L.*). *Journal of Integrative Agriculture*, 19(1), 99-107.

Sapirstein, H., Wu, Y., Koksel, F., & Graf, R. (2018). A study of factors influencing the water absorption capacity of Canadian hard red winter wheat flour. *Journal of Cereal Science*, 81, 52-59.

Sayar, R., Khemira, H., Kameli, A., & Mosbahi, M. (2008). Physiological tests as predictive appreciation for drought tolerance in durum wheat (*Triticum durum Desf*). *Agronomy research*, 6(1), 79-90.

Seyoum, E.G., & Sisay, A. (2021). Genetic variability, heritability and genetic advance study in bread wheat genotypes (*Triticum aestivum L.*). *Advances in bioscience and bioengineering*, 9(3), 81-86.

Shahriari, S., Puteh, A.A.B., Saleh, G.B., & Rahim, A.B.A. (2014). Germination at low osmotic potential as a selection criterion for drought stress tolerance in sweet corn. *African Journal of Biotechnology*, 13(2).

Shahverdikandi, M.A., Tobeh, A., Godehkahriz, S.J., & Rastegar, Z. (2011). The study of germination index of canola cultivars for drought resistance. *Int. J. Agron. Plant Prod*, 2(3), 89-95.

Sharma, V., Dubey, R.B., & Khan, R. (2019). Genotype- environment interaction on stability of grain yield and physio-biochemical traits in bread wheat (*Triticum aestivum L.*). *Bangladesh J. Bot*, 48,(4), 1143-1151.

Sharma, V., Kumar, A., Chaudhary, A., Mishra, A., Rawat, S., Shami, V., & Kaushik, P. (2022). Response of Wheat Genotypes to Drought Stress Simulated by PEG. *Stresses*, 2(1), 26-51.

- Sheoran, O.P., Tonk, D.S., Kaushik, L.S., Hasija, R.C., & Pannu, R.S. (1998).** Statistical software package for agricultural research workers. Recent advances in information theory, Statistics & Computer Applications by Hooda DS and RC., Hasija Department of Mathematics Statistics, CCS HAU, Hisar (139–143). In: OPSTAT <http://14.139.232.166/opstat/> accessed: September 2021.
- Shewry, P. R., Tatham, A. S., Forde, J., Kreis, M. & Mifflin, B. J. (1986).** The classification and nomenclature of wheat gluten proteins: a reassessment. *Journal of Cereal Science* 4, 97-106.
- Shewry, P.R., & Halford, N.G. (2002).** Cereal seed storage proteins: structures, properties and role in grain utilization. *Journal of Experimental Botany* ,53(370),947-958.
- Shewry, P.R., & Hey, S.J. (2015).** The contribution of wheat to human diet and health. *Food Energy Secur*, 4, 178-202.
- Shunbura, A.K., Rorisa, S.A., Gedefa, K.K. (2024).** Genotype by environment interaction and stability study in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes in Guji Zone, Southern Ethiopia. *GSC Advanced research and Reviews*. 19(02), 085-092.
- Siddiqui, M.N., Leon, J., Naz, A.A. & Balivora, A. (2021).** Genetics and genomics of root system variation in adaptation to drought stress in cereal crops. *J. Exp. Bot.*, 72, 1007-1019.
- Šimić, G., Horvat, D., Jurković, Z., Drezner, G., Novoselović, D., & Dvojković, K. (2006).** The genotype effect on the ratio of wet gluten content to total wheat grain protein. *Journal of Central European Agriculture*, 7(1), 13-18.
- Sindhu, R., & Khatkar, B.S. (2021).** Recent Trends in Technologies of Cereal Based Food Products. *In Advances in Cereals Processing Technologies* (pp.109-130). CRC Press.
- Singh, A.K., Srivastava, J.P., & Lal, J.P. (2016).** Effect of PEG-6000 induced osmotic stress on germination, growth and nutrient uptake of two lentil [*Lens culinaris* (Medikus)] genotypes. *Journal of Food Legumes*, 29 (3 and 4), 188-194.
- Sivasubramanian, S., & Menon, M. (1973).** Heterosis and inbreeding depression in rice. *Madras Agric. J*, 60(7), 1139-1140.
- Slafer G. A., Araus J. L., Royo C. & Del Moral L. G. (2005).** Promising ecophysiological traits for genetic improvement of cereal yields in Mediterranean environments. *Journal of Applied Biology* 146, 61-79.
- Slafer G.A., Savin R. & Sadras V.O., (2014).** Coarse and fine regulation of wheat yield components in response to genotype and environment. *Field Crops Research* 157, 71–83.
- Sohail, A., Rahman, H., Ullah, F., Shah, S.M.A., Burni, T., & Ali, S. (2018).** Evaluation of F4 bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes for genetic variability, Heritability, genetic advance

and correlation studies. *Journal of plant breeding and genetics*, 6(1), 1-7.

Spagnoletti Zeuli, P.L., & Qualset, C.O. (1990). Flag leaf variation and the analysis of diversity in durum wheat. *Plant Breeding* 105(3): 189–202.

Španić, V.; Ižaković, M.; Marček, T. (2017). Wheat germination and seedlings under PEG-induced conditions. *Agron. Glas. Agron. J.*, 79, 99–109.

Sramkova, Z., Gregovab, E., & Sturdika, E. (2009). Chemical composition and nutritional quality of wheat grain. *Acta Chimica Solvaca*, 2(1) ,115-138.

stress on physiological and yield parameters at anthesis stage in elite spring wheat cultivars. *Sarhad J. of Agric.* 27(1), 59-65.

Surget, A., & Barron, C. (2005). Histologie du grain de blé. *Industrie des céréales*, n.145.

Talukder, A.S., McDonald, G.K., Gill, G.S. (2014). Effect of short- term heat stress prior to flowering and early grain set on the grain yield of wheat. *Field Crops Research*, 160, 54-63.

Tanacs, L., Matuz, J., & Petroczi, I. M. (2008). Correlations between wet gluten content, valorigraphic value and alveographic parameters of winter wheat. *Cereal Research Communications*, 36(1), 89-95.

Taneva, K., Bozhanova, V., & Petrova, I. (2019). Variability, heritability and genetic advance of some grain quality traits and grain yield in durum wheat genotypes. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*,25(2),288-295.

Tawfeuk, H.Z., & Gomaa, R.A. (2017). Evaluation of some new durum wheat genotypes in Egypt. *Egypt. J. Food Sci*,45, 155-163.

Temagoult M. (2009). Analyse de la variabilité de la réponse au stress hydrique chez des lignées recombinantes de Tournesol (*Helianthus annuus* L.). Mémoire de Magistère, Univ *Mentouri, Constantine*, 106p

Thakur, V., Rane, J., & Nankar, A.N., (2022). Comparative analysis of canopy cooling in wheat under high temperature and drought stress. *Agronomy*, 12(4), 978.

Trethowan, R.M., Van Ginkel, M., Ammar, K., et al. (2003). Associations among twenty years of international bread wheat yield evaluation environments. *Crop Sci*, 43, 1698-1711.

Tripura, K., Singh, G. P., Singh, A.M., Arora, A., Ahlawat, A., & Sharma, R.K. (2011). Stability analysis for physiological parameters and grain yield in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Indian J. Plant Physiol*, 16, 26-34.

Tsilo, T.J., Nygard, G., Khan, K., Simsek, S., Hareland, G.A. & Chao, S. (2013). Molecular genetic mapping of QTL associated with flour water absorption and farinograph related traits in bread wheat. *Euphytica* 194(2), 293-302.

- Ullah, H., Khan, W.U., Alam, M., Khalil, I.H., Adhekari, K.N., Shahwar, D., Jamal, Y., Jan, I., & Adnan, M. (2016).** Assessment of G* E interaction and heritability for simplification of selection in spring wheat genotypes. *Can. J. Plant Sci*, 96, 1021-1025.
- Upadhyaya, N.M., Mago, R., Panwar, V., Hewitt, T., Luo, M., Chen, J., & Dodds, P.N. (2021).** Genomics accelerated isolation of a new stem rust avirulence gene-wheat resistance gene pair. *Nature Plants*, 7(9), 1220-1228.
- Vida, G., Szunics, L., Veisz, O., Bedo, Z., Lang, L., Arendas, T. (2014).** Effect of genotypic, meteorological and agronomic factors on the gluten index of winter durum wheat. *Euphytica*, 197, 61-71.
- Walker, C.E., & Eustace, W.D. (2016).** Milling and Baking: History. *Reference module in food sciences*, Vol 3, Elsevier. Academic press 299-306.
- Wieser, H., & Kieffer, R. (2001).** Correlations of the amount of gluten protein types to technological properties of wheat flours determined on a micro-scale. *Journal of Cereal Science*, 34, 19-27.
- Wrigley, C., Bekes, F., & Bushuk, W. (2006).** Gliadin and Glutenin: the unique balance of wheat quality, edited by AACC international press, 446 p.
- Xiaojie, C., Donghong, M., Tauqeer, A. Y., & Yin-Gang, H. (2012).** Evaluation of 14 morphological, yield-related and physiological traits as indicators of drought tolerance in Chinese winter bread wheat revealed by analysis of the membership function value of drought tolerance (MFVD). *Field Crops Research*, 137, 195-201.
- Xie, Q., Mayes, S., & Sparkes, D.L. (2015).** Carpel size, grain filling, and morphology determine individual grain weight in wheat. *Journal of Experimental Botany*, 66(21), 6715-6730.
- Yadav, N., Dashora, A., Choudhary, U., Dave, M., & Rathore, J. (2021).** Assessment of genetic variability, heritability and genetic advance in bread wheat (*Triticum aestivum L.*) genotypes, *The pharma innovation journal*, 10(9), 528-530.
- Zafar, M.M., Jia, X., Shakeel, A., Sarfraz, Z., Manan, A., Imran, A., & Ren, M. (2021).** Unravelling heat tolerance in upland cotton (*Gossypium hirsutum L.*) using univariate and multivariate analysis. *Frontiers in Plant Science*, 12, 727835-727835.
- Zare, S., Mirlohi, A., Saeidi, G., Sabzalian, M.R., & Ataii, E. (2021).** Water stress intensified the relation of seed color with lignan content and seed yield components in flax (*Linum usitatissimum L.*). *Scientific Reports*, 11(1), 1-15.
- Zhang, C. H., Jiang, D., Liu, F. L., Cai, J., Dai, T. B., & Cao, W. X. (2010).** "Starch granules size distribution in superior and inferior grains of wheat is related to enzyme activities and their gene expressions during grain filling." *Journal of Cereal Science*, 51(2), 226-233.

Zolian, S., Zoong, L., Welti, R., Anco, D., Naveed, S., Rustgi, S., Narayanan, S. (2020). Heat stress elicits remodeling in the anther lipidome of peanut. *Scientific reports*, 10: 22163.

Zorb, C., Ludewig, U., & Hawkesford, M.J. (2018). Perspective on wheat yield and quality with reduced nitrogen supply. *Trends Plant Sci*, 23, 1029-1037.