

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Université Farhat Abbas Sétif 1
Faculté des Sciences
de la Nature & Vie



جامعة فرحة عباس سطيف 1
كلية علوم الطبيعة والحياة

Faculté des Sciences de la Nature & Vie
Département d'Agronomie

THESE

N°SNV/2025

Présenté Par

DJOUDI Mohamed Badr Islam

Pour l'obtention du diplôme

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

Filière : Agronomie

Spécialité : Production végétale

THEME

Evaluation de la productivité du blé dur (*Triticum durum*) en relation avec les pertes à la récolte induites par certains paramètres incidents en zone semi-aride de Sétif

Soutenu publiquement le :

Devant le jury composé de :

Nom & Prénom	Qualité	Grade	Etablissement
Rouabhi Amar	Président	Maitre de conférences A	UFA Sétif 1
Cheniti Khalissa	Directeur de thèse	Maitre de conférences A	UFA Sétif 1
Guendouz Ali	Co-directeur de thèse	Directeur de Recherche	INRAA Sétif
Mekhlouf Abdelhamid	Examinateur	Professeur	UFA Sétif 1
Bouchareb Radia	Examinateur	Maitre de conférences A	UFM- Constantine
Maamri Khelifa	Examinateur	Maitre de conférences A	UMBI-BBA

Année de soutenance 2025

Laboratoire Amélioration de la production végétale et animale (LADPVA)

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

الملخص:

يمثل تحسين الإنتاجية لدى القمح الصلب (*Triticum durum* Desf.) مع الظروف المناخية شبه الجافة تحدياً أساسياً لضمان الأمن الغذائي واستدامة أنظمة الحبوب في الجزائر. وقد أُنجزت هذه الدراسة خلال موسمين زراعيين (21-2020 و 22-2021) في ثلاثة مواقع زراعية ببيئة بولاية سطيف (المعهد التقني للزراعة الكبرى، عين ولمان وبني فودة)، حيث تم تقييم ثلاثة أنماط وراثية مختلفة: بوسلام (BOS)، واد البارد (OB)، و (GTA-dur)، وفق تصميم تجريبي عشوائي كامل الكتل. كان الهدف الأساسي هو تحديد محددات الإنتاجية في المناطق شبه الجافة من خلال التحليل المشترك للأداءات الزراعية. المورفولوجية، الفسيولوجية، وديناميكية امتلاء الحبوب، والخسائر المرتبطة بعملية الحصاد. أظهرت تحاليل التباين وجود تأثيرات معنوية لكل من النمط الوراثي والموقع والسنة على عدة مؤشرات، منها محتوى الكلوروفيل، ودرجة حرارة الطعام النباتي، واستقرار الأغشية، والتباير في النمو، مما يبرز وجود تفاعل بين النمط الوراثي والبيئة. وقد أظهر صنف بوسلام أداءً جيداً بشكل عام، دون وجود فروقات معنوية في المردود الحبي. أما التحاليل متعددة المتغيرات، فقد أبرزت أهمية عدد السنابيل/ m^2 ، وعدد الحبوب/سنبلة، والكتلة الحيوية، وارتفاع النباتات، مع دور محوري لوزن ألف حبة. وأظهرت دراسة ديناميكية امتلاء الحبوب وجود تراكم للمادة الجافة وفق منحنى سigmoidي، حيث تأثرت المؤشرات الخاصة بهذه الديناميكية بالنمط الوراثي والبيئة. وتميز الصنف OB بمعدل امتلاء جيد (TRG) ووزن حبة مرتفع، في حين أظهر الصنف GTA مدة امتلاء أطول ولكن بوزن نهائي للحبة أقل. وقد تبين أن كل من TRG وشدة الامتلاء (IAR) هما أفضل مؤشرات تنبؤية للوزن الأقصى للحبوب، بينما كان لكل من مدة الامتلاء (DRG) والسرعة القصوى للامتلاء (VMR) تأثيرات غير مباشرة. أما تقييم الجودة التكنولوجية والخسائر المرتبطة بالحصاد، فقد أظهر فروقات معنوية بين الأنماط الوراثية في محتوى البروتين (15.38-17.35٪) والوزن النوعي (75-78.84 كغ/هكتولتر). كما تم تسجيل ارتباط قوي بين انخفاض نسبة الرطوبة بعد النضج وخسارة المردود، حيث تم تمثيل هذا الانخفاض بشكل فعال (6.2% من التباين المفسّر)، مع خسارة متوسطة مقدّرة بـ 1.0151 قنطار/هكتار لكل انخفاض بنسبة 1% من الرطوبة. بالإضافة إلى ذلك، لوحظ عدم استقرار كبير في أداء آلة الحصاد خلال موسم 21-2020، تمثل في تباين مرتفع ومعامل انحدار (bi) أكبر من 1، ما يدل على وجود خسائر ميكانيكية معتبرة.

الكلمات المفتاحية: القمح الصلب، المناطق شبه الجافة، امتلاء الحبوب، المردود، خسائر الحصاد.

Résumé

L'amélioration de la productivité du blé dur (*Triticum durum* Desf.) aux conditions climatiques semi-arides constitue un enjeu crucial pour la sécurité alimentaire et la durabilité des systèmes céréaliers en Algérie. Cette étude a été menée durant deux campagnes agricoles (2020-21 et 2021-22) dans trois sites agroécologiques de la wilaya de Sétif (ITGC, Ain Oulmène et Béni Fouda), en évaluant trois génotypes différentes : Boussellam (BOS), Oued El Bared (OB) et GTA-dur (GTA), selon un dispositif en blocs complètement randomisés. L'objectif principal était d'identifier les déterminants de la productivité en zones semi-arides à travers l'analyse conjointe des performances agro-morpho-physiologiques, de la dynamique de remplissage des grains et des pertes liées à la récolte. L'analyse de la variance a révélé des effets significatifs du géotype, du site et de l'année sur plusieurs paramètres, notamment la teneur en chlorophylle, la température du couvert, la stabilité membranaire et la précocité, soulignant l'interaction géotype x environnement. Boussellam a affiché de bonnes performances globales, sans différence significative sur le rendement en grains. Les analyses multivariées ont mis en évidence l'importance du nombre d'épis/m², du nombre de grains/épi, de la biomasse et de la hauteur des plantes, avec un rôle clé du poids de mille grains. L'étude de la dynamique du remplissage a montré une accumulation de matière sèche suivant une courbe sigmoïde, avec des paramètres influencés par le géotype et l'environnement. OB s'est distingué par un bon taux de remplissage (TRG) et un poids de grain élevé, alors que GTA a présenté une durée plus longue mais un poids final plus faible. Le taux de remplissage (TRG) et l'intensité de remplissage (IAR) ont été les meilleurs prédicteurs du poids maximal des grains, tandis que la durée (DRG) et la vitesse maximale (VMR) ont eu des effets indirects. L'évaluation de la qualité technologique et des pertes à la récolte a révélé des différences significatives entre génotypes pour la teneur en protéines (15,38-17,35 %) et le poids spécifique (75-78,84 kg.hL⁻¹). Une corrélation forte a été établie entre la baisse d'humidité post-maturité et la perte de rendement, modélisée efficacement (62 % de variance expliquée), avec une perte moyenne estimée à 1,0151 q.ha⁻¹ pour chaque diminution de 1 % d'humidité. En outre, une instabilité importante de la moissonneuse a été observée en 2020-21, traduite par une variance élevée et un coefficient de régression bi > 1, indiquant des pertes mécaniques notables.

Mots clés : Blé dur, semi-arides, remplissage des grains, rendement, pertes à la récolte.

Abstract:

Improving the productivity of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) to semi-arid climatic conditions is a crucial challenge for food security and the sustainability of cereal-based systems in Algeria. This study was conducted over two cropping seasons (2020-21 and 2021-22) at three agroecological sites in the Sétif province (ITGC, Ain Oulmene, and Beni Fouda), evaluating three different genotypes: Boussellam (BOS), Oued El Bared (OB), and GTA-dur (GTA), using a completely randomized block design. The main objective was to identify the determinants of productivity in semi-arid zones through a combined analysis of agro-morpho-physiological performance, grain-filling dynamics, and harvest-related losses. Analysis of variance revealed significant effects of genotype, site, and year on several parameters, including chlorophyll content, canopy temperature, membrane stability, and earliness, highlighting genotype \times environment interaction. Boussellam exhibited good overall performance, with no significant differences in grain yield. Multivariate analyses emphasized the importance of the number of spikes per m², grains per spike, biomass, and plant height, with a key role played by thousand-kernel weight. The study of grain-filling dynamics showed a sigmoid dry matter accumulation curve, with parameters influenced by both genotype and environment. OB stood out for its high grain-filling rate (TRG) and high grain weight, whereas GTA exhibited a longer duration but lower final grain weight. Grain-filling rate (TRG) and the absolute filling intensity (IAR) were the best predictors of maximum grain weight, while duration (DRG) and maximum filling rate (VMR) had indirect effects. The evaluation of technological quality and harvest losses revealed significant differences between genotypes in protein content (15.38-17.35%) and test weight (75-78.84 kg.hL⁻¹). A strong correlation was established between post-maturity moisture decline and yield loss, effectively modeled (62% of variance explained), with an average estimated loss of 1.0151 q.h⁻¹ for every 1% decrease in moisture content. Additionally, significant instability in the harvester's performance was observed in 2020-21, reflected by high variance and a regression coefficient (b_1) > 1 , indicating considerable mechanical losses.

Keywords: Durum wheat, semi-arid, grain filling, yield, harvest losses.

Liste des Abréviations

ACP	Analyse en Composantes Principales
AO	Aïn Oulmène
ANOVA	Analyse de la Variance
BIO	Biomasse totale
BF	Béni Fouda
BOS	Boussellam
CHL	Teneur en chlorophylle
CV	Coefficient de variation
DRG	Durée de remplissage des grains
EAM	Erreur Absolue Moyenne
EQM	Erreur Quadratique Moyenne
FA	Analyse Factorielle
GTA	GTA-dur
Hlab	Humidité en laboratoire
HC	Humidité au champ
HP	Hauteur de la Plante
IAR	Intensité absolue de remplissage
IR	Indice de Récolte
ITGC	Institut Technique des Grandes Cultures
LSD 5%	Différence significative minimale
NEm²	Nombre d'Épis par mètre carré
NGE	Nombre de Grains par Épi
NJE	Nombre de Jours à l'Épiaison
OB	Oued El Bared
PMax	Poids maximal des grains
PMG	Poids de Mille Grains
PS	Poids spécifique
Path	Analyse de Chemin (Path Analysis)
RDT	Rendement en grains
Reg	Régression Linéaire

r	Coefficient de corrélation
SF	Surface foliaire
Step	Régression stepwise
TC	Température du couvert végétal
TMD	Taux de Mitadinage
TP	Teneur en protéines
TRE	Teneur relative en eau
TRG	Taux de remplissage des grains
VMR	Vitesse maximale de remplissage

Liste des tableaux

Tableau 1: Le pedigree et l'origine des génotypes testés.....	34
Tableau 2: Carrés moyens de l'analyse de la variance des variables physiologiques mesurées sur les deux compagnes	45
Tableau 3: Valeurs moyennes des paramètres physiologiques mesurés pour les génotypes..	51
Tableau 4: Carrés moyens de l'analyse de la variance des variables phéno-morphologiques mesurées sur les deux compagnes.....	52
Tableau 5: Comparaison des moyennes des variables phéno-morphologiques mesurées sur deux compagnes et trois sites	56
Tableau 6: Carrés moyens de l'analyse de la variance des variables agronomiques.	57
Tableau 7: Comparaison des moyennes des variables agronomiques sur deux saisons et trois sites.....	65
Tableau 8: Classement des génotypes selon les paramètres agronomiques lors des deux saisons.	66
Tableau 9: Corrélations entre les variables étudiées au cours des campagnes agricoles.....	69
Tableau 10: Coefficients de régression (b), valeur t et probabilité (P) des variables estimées pour la prédiction du rendement en grains par régression linéaire multiple.	74
Tableau 11: Prédiction du rendement en grains par l'analyse de régression par étapes.....	75
Tableau 12: Effets directs standardisés des variables explicatives sur le rendement en grain.	76
Tableau 13: Analyse factorielle des huit caractères agronomiques en 2020-21	77
Tableau 14: Résumé des coefficients de saturation des facteurs pour les huit caractères étudiés 2020-21	77
Tableau 15: Analyse factorielle des huit caractères agronomiques en 2021-22.....	78
Tableau 16: Résumé des coefficients de saturation des facteurs pour les huit caractères étudiés 2021-22	78

Tableau 17: Score des facteurs influençant le rendement en grains 2020-21 et 2021-22.....	80
Tableau 18: Carrés moyens de l'ANOVA combinée des paramètres du remplissage du grain.	
.....	91
Tableau 19: Moyennes génotypiques des paramètres de remplissage des grains durant les deux campagnes.	93
Tableau 20: Effets directs des variables explicatives sur le poids des grains maximal.	95
Tableau 21: Prédiction du rendement en grains basée sur les paramètres de remplissage des grains.	96
Tableau 22: Carrés moyens de l'analyse de la variance du rendement et des variables technologiques.....	109
Tableau 23: Comparaison des moyennes des variables agronomiques sur deux saisons et trois sites.....	115
Tableau 24: Coefficient de corrélation entre l'humidité des grains, le rendement en grains et les paramètres de qualité.	119
Tableau 25: Indices statistiques pour évaluer la performance du modèle de régression dans la prédiction du rendement en grain.....	121
Tableau 26: Analyse de la variance des pertes des grains causés par les moissonneuses batteuses.	125
Tableau 27: Évaluation de la stabilité de la performance de la moissonneuse-batteuse selon l'indice d'Eberhart et Russell (1966).	126

Liste des figures

Figure 1: Origine et évolution génétique du blé dur (<i>Triticum durum</i> Desf.) (Schuhwerk, et al., 2011).....	5
Figure 2: Description de la plante de blé (Mulubrok, 2019).....	7
Figure 3: (a) Quantité moyenne annuelle d'exportation de blé dur et (b) quantité moyenne annuelle d'importation de blé dur, en tonnes par pays (2017–2021), d'après les données WITS (Mendes et al., 2022), cartographiées avec QGIS.....	9
Figure 4: Production totale de céréales en Algérie (1961–2023) (FAOSTAT, 2025).	10
Figure 5: Évolution de la production de blé en Algérie entre 1963 et 2019 (FAOSTAT, 2020)	
.....	11
Figure 6: Indice de Stress Agricole (ASI) en Algérie (FAO, 2024).	16
Figure 7: Localisation des sites expérimentaux durant les deux campagnes.....	33
Figure 8: Évaluation de la teneur en chlorophylle à l'aide du SPAD	35
Figure 9: Températures moyennes mensuelles des deux campagnes agricoles (2020-21 et 2021-22) sur les trois sites d'étude.	42
Figure 10: : Analyse ombrothermique des précipitations et des températures moyennes mensuelles enregistrées au cours des deux campagnes des trois sites d'étude.	44
Figure 11: Visualisation des relations des variables et des génotypes selon les trois premières	

composantes de l'ACP (2020-21).....	70
Figure 12: Pourcentage de variance expliquée par dimension dans l'ACP (2020–21).....	71
Figure 13: Représentation des génotypes et des variables sur les trois premières composantes principales de l'ACP en 2020-21.	71
Figure 14: Visualisation des relations des variables et des génotypes selon les trois premières composantes de l'ACP (2021-22).....	72
Figure 15: Graphique montrant la variance expliquée en fonction des composantes principales 2021-22	72
Figure 16: Représentation des génotypes et des variables sur les trois premières composantes principales de l'ACP en 2021-22.	73
Figure 17: Effet direct et indirect des variables sur le rendement en grain.....	76
Figure 18: Niveaux de similarité des variables estimées et des génotypes du blé dur à l'aide de l'analyse de classification hiérarchique.	80
Figure 19: Cinétique du remplissage du grain (g) pour trois génotypes, Boussellam (BOS), Oued El-Bared (OB) et GTA-dur (GTA), sur les trois sites de culture : Ain Oulmene (AO), (ITGC) et Beni Fouda (BF).....	92
Figure 20: Effets des paramètres de remplissage sur le poids maximal des grains.	94
Figure 21: Variation de la durée de remplissage des grains en fonction du taux de remplissage.....	95
Figure 22: Outil d'estimation des pertes de la moissonneuse batteuse.....	108
Figure 23: Réduction du rendement en grain en fonction de la perte d'humidité des grains entre la maturation et la récolte au cours des deux campagnes agricoles 2020-21 et 2021-22.	117
Figure 24: Régression linéaire entre l'humidité des grains au champ (HC) et le rendement en grains (RDT) en (A), rendement en grains observé et simulé en (B).....	121
Figure 25: Variation des pertes de grains de blé dur (kg.h ⁻¹) en fonction des sites expérimentaux et des campagnes de récolte.	123
Figure 26: Écart des pertes de récolte par rapport au seuil d'acceptabilité de 2 %.	124

Table des matières

الملخص:

Résumé

Abstract:

Liste des Abréviations

Liste des tableaux

Liste des figures

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE..... 1

Chapitre I : Revue bibliographique..... 4

1. Historique et origine du blé dur	4
2. Origine génétique	4
3. Taxonomie du blé dur	5
4. Morphologie générale du blé	5
5. Description de l'inflorescence et de la fleur du blé	6
6. État actuel du rendement du blé dur	7
6.1 Rendement mondial.....	7
Flux mondiaux de blé dur	9
6.2 En Algérie	10
6.2.1 La production céréalière en Algérie	10
6.2.2 Caractéristiques climatiques des hauts plateaux algériens	11
7. Contraintes abiotiques et impacts sur la culture du blé dur	12
7.1 L'éclairement	12
7.2 La température.....	13
7.2.1 Les températures basses : effets sur le blé.....	13
7.2.2 Les températures élevées (Stress thermique)	14
7.2.3 Stress hydrique	14
8. Paramètres de sélection variétale du blé dur face aux contraintes abiotiques	16
8.1 Critères phénologiques	16
8.2 Critères morphologiques	17
8.3 Critères physiologiques	17
9. Le remplissage des grains : un critère clé pour la sélection variétale sous stress abiotiques	
18	
10. Paramètres de qualité technologique du grain de blé dur.....	19
10.1 Teneur en humidité : influence sur la conservation et la récolte.....	19
10.2 Teneur en protéines : lien avec la qualité du gluten et la transformation.....	20
10.3 Poids spécifique : indicateur de densité et de bonne maturation.....	20

10.4	Taux de mitadinage : impact sur la mouture et la semoulabilité.....	21
10.5	Proche infrarouge et qualité technologique : vers une analyse efficace et précise du blé dur	21
11.	Facteurs influençant la qualité du grain	22
11.1	Facteurs génétiques	22
11.2	Facteurs environnementaux.....	22
12.	Moment et méthode de récolte	22
12.1	Pertes de rendement qualitative et quantitative	23
	Effets du retard de récolte sur le rendement et la qualité technologique du blé dur.....	23
12.2	Pertes causées par la moissonneuse-batteuse	24
Chapitre II .....	.....	26
الملخص .....	.....	26
Résumé .....	.....	27
Abstract .....	.....	28
INTRODUCTION.....	.....	29
MATERIELS ET METHODES .....	.....	32
1. Site expérimental .....	.....	32
2. Matériel végétal et conduite culturale .....	.....	33
3. Caractères mesurés et notations réalisées .....	.....	35
3.1 Paramètres physiologiques .....	.....	35
3.1.1 Teneur en chlorophylle (CHL spad).....	.....	35
3.1.2 La teneur relative en eau (TRE %) .....	.....	35
3.1.3 La vitesse de perte d'eau (LWL).....	.....	36
3.1.4 Fuite des électrolytes (FE %) .....	.....	36
3.1.5 Température du couvert végétal (TC °C).....	.....	37
3.2 Paramètres phéno-morphologiques .....	.....	37
3.2.1 Nombre de jours à l'épiaison (NJE) .....	.....	37
3.2.2 Surface de la feuille étandard (SF cm) .....	.....	37
3.2.3 Poids Spécifique Foliaire (PSF mg.cm ⁻²) .....	.....	37
3.2.4 Hauteur de la plante (HP cm) .....	.....	38
3.3 Les paramètres agronomiques .....	.....	38
3.3.1 Rendement en grains (RDT q.h ⁻¹) .....	.....	38
3.3.2 Biomasse aérienne (Bio q.h ⁻¹) .....	.....	38
3.3.3 Indice de la récolte (IR %) .....	.....	38
3.3.4 Poids de mille grains (PMG g) .....	.....	38
3.3.5 Nombre de grains par épis (NGE ⁻¹) .....	.....	39
3.3.6 Nombre d'épis par mètre carré (NEm ⁻²).....	.....	39

4.	Analyse statistique	39
4.1	Analyse de la variance (ANOVA).....	39
4.2	Corrélation linéaire simple	39
4.3	Régression linéaire multiple.....	40
4.4	Régression multiple linéaire pas à pas (Stepwise régressions)	40
4.5	Analyse du chemin (Path Analysis)	40
4.6	Analyse en composantes principales (ACP)	41
4.7	Classification Hiérarchique Ascendante (CAH)	41
	RÉSULTATS ET DISCUSSION	41
1.	Analyse des données climatiques.....	41
1.1	Température :	41
1.2	Pluviométrie	42
2.	Evaluation des paramètres physiologiques	44
2.1	Teneur en chlorophylle (CHL)	45
2.2	Teneur relative en eau (TRE)	46
2.3	Vitesse de perte d'eau (LWL)	47
2.4	Fuite des électrolytes (FE).....	48
2.5	La température du couvert végétal TC (°C)	49
3.	Evaluation des paramètres phéno-morphologiques	52
3.1	Nombre de jours à l'épiaison (NJE)	52
3.2	Surface foliaire (SF)	53
3.3	Poids spécifique foliaire (PSF)	54
3.4	Hauteur de la plante (HP).....	55
4.	Evaluation des paramètres agronomiques.....	56
4.1	Rendement en grains (RDT)	57
4.2	Poids de mille grains (PMG).....	59
4.3	Nombre d'épis par mètre carré (NEm ⁻²).....	60
4.4	Nombre des grains par épi (NGE ⁻¹).....	61
4.5	Biomasse (Bio)	62
4.6	Indice de récolte (IR).....	63
5.	Classement des génotypes selon les paramètres agronomiques.....	66
6.	Analyse des corrélations entre l'ensemble des paramètres étudiés	66
6.1	Analyse de corrélation simple	66
6.2	Analyse en Composant Principale (ACP)	70
6.3	Analyse de régression linéaire multiple	73
6.4	Analyse de régression par étapes « pas à pas » (Stepwise Analysis)	74
6.5	Analyse de Chemin (Path Analysis).....	75

6.6 Analyse Factorielle.....	76
6.7 Classification Hiérarchique Ascendante (CAH)	78
6.7.1 Classification des variables	78
6.7.2 Classification des génotypes	79
7. Combinaison des analyses effectué	80
Conclusion.....	81
CHAPITRE III	84
الملخص.....	84
Résumé	85
Abstract	86
INTRODUCTION.....	87
MATERIELS ET METHODES :.....	88
1. Matériel végétal et dispositif expérimental	88
2. Mesures agronomiques et paramètres de remplissage du grain	88
3. Analyse statistique	89
RESULTATS ET DISCUSSION.....	89
1. Évolution du remplissage des grains.....	89
2. Sources de variation des composantes du remplissage du grain.....	90
3. Analyse des facteurs explicatifs du poids maximal des grains	94
Conclusion.....	97
Chapitre IV	100
الملخص.....	100
Résumé	101
Abstract	102
Introduction	103
MATERIELS ET METHODES :.....	105
1. Matériel végétal et site expérimentale	105
2. Mesures agronomiques et technologiques	105
2.1 Paramètres agronomiques	105
2.2 Paramètres technologiques	105
2.2.1 Teneur en protéines (TP %)	105
2.2.2 Taux de grains non vitreux (Mitadinage %).....	106
2.2.3 Poids spécifique (PS Kg. hL ⁻¹).....	106
2.2.4 Taux d'humidité en laboratoire (HLAB %)	106
3. Evaluation de la performance du modèle de prédition.....	106
3.1 Erreur Absolue Moyenne (EAM).....	106
3.2 Erreur Quadratique Moyenne (EQM)	107

3.3 Indice d'accord (D)	107
3.4 Coefficient d'efficacité (E).....	107
3.5 Coefficient de corrélation (r).....	107
4. Analyse des pertes de rendement liées à la moissonneuse-batteuse	108
5. Analyse statistique	109
RÉSULTATS ET DISCUSSION.....	109
1. Rendement en grain (RDT).....	109
2. Humidité des grains au champs (HC %).....	110
3. Paramètres technologiques.....	111
3.1 Teneur en protéines (TP %)	111
3.2 Poids spécifique (PS Kg.hL ⁻¹)	112
3.3 Taux de grains non vitreux « Mitadinage » (TMD%).....	113
4. Réduction du rendement en grain en fonction de la perte d'humidité des grains	116
5. Corrélations entre les différents paramètres étudiés	118
6. Estimation des pertes de rendement en grain en fonction de l'humidité du grain.	119
7. Évaluation de la performance du modèle.....	120
8. Pertes quantitatives due à la moissonneuse batteuse	122
CONCLUSION	126
Conclusion Générale	129
Références bibliographiques	133

REMERCIEMENT

Avant toute chose, je rends grâce à **ALLAH Le Tout-Puissant**, pour m'avoir accordé la patience, la force, la persévérance et la santé nécessaires à l'accomplissement de ce travail.

Sans Sa volonté, rien de tout cela n'aurait été possible.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à **Madame le Docteur CHENITI Khalissa**, Maître de Conférences à l'Université Ferhat Abbas Sétif 1, et directrice de cette thèse, pour son encadrement rigoureux, sa disponibilité, son accompagnement constant et ses conseils éclairés. Son soutien moral et scientifique m'a été d'une grande aide tout au long de ce travail de recherche.

Je remercie également avec une sincère gratitude **Monsieur le Professeur GUENDOUZ Ali**, de l'Institut National de la Recherche Agronomique d'Algérie (INRAA), pour avoir accepté de Co-encadrer cette thèse. Sa grande expertise scientifique, sa rigueur intellectuelle ainsi que ses conseils avisés ont apporté une contribution précieuse à la qualité de ce travail.

Son accompagnement méthodologique et ses encouragements constants ont été d'un grand soutien tout au long de ce parcours doctoral. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

J'adresse mes remerciements les plus respectueux à **Monsieur le Président du jury**, ainsi qu'à **l'ensemble des examinateurs**, pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'évaluer cette thèse, pour leur disponibilité, leurs remarques constructives et leurs suggestions pertinentes qui ont permis d'améliorer la qualité de ce travail.

Je tiens également à exprimer mes sincères remerciements à Monsieur **Limani Yassin**, mon professeur, pour son soutien constant, ainsi que son accompagnement technique et scientifique tout au long de ce travail.

Mes remerciements les plus chaleureux vont également à **l'équipe de l'INRAA de Sétif : Dr. HANNACHI Abd Elrrahmane, Madame Boulekbas Sara, Madame Ghali Khaoula et Dr. Gaamoune Sofiane**, pour leur appui technique, leur encadrement sur le terrain et leur disponibilité bienveillante tout au long de la phase expérimentale.

Je remercie aussi l'**équipe de l'ITGC de Sétif** pour leur collaboration et leur soutien lors des essais et des observations.

Je tiens à exprimer ma gratitude envers le **laboratoire LADPVA** de l'Université Ferhat Abbas Sétif 1 pour les moyens techniques mis à ma disposition et pour leur appui lors de la réalisation des analyses en laboratoire.

Je remercie sincèrement toutes les **institutions et structures** qui ont soutenu et facilité ce travail de recherche : le **Moulin SMID Tell**, le **laboratoire Mordjana Lab**, ainsi que les **fermes pilotes de M. Mahnen Said** et de **M. Habbech Ibrahim**. Leur apport a été essentiel pour la mise en œuvre et la réussite de cette étude.

Enfin, mes remerciements les plus affectueux vont à **mes collègues doctorants, amis et collaborateurs**, pour leur soutien, leur encouragement, leur bienveillance et les nombreux échanges enrichissants partagés au cours de ce parcours.

DÉDICACE

À **mon père** bien-aimé « **Abd El Hakim** », pilier de ma vie, dont les prières, les conseils et l'exemple de rigueur m'ont toujours guidé.

À **ma mère** chérie « **Samia** », source inépuisable d'amour, de tendresse et de patience, qui a toujours cru en moi même dans les moments de doute.

À mes frères, **AMER** et **Abd El Fatah**, pour leur soutien, leur affection fraternelle et leur présence constante à mes côtés.

À mes sœurs, **Souhir**, **Mariem Ayat Elrrahmane**, pour leur amour, leur bienveillance et leur encouragement dans cette aventure.

À ma chère épouse **Kenza**, pour son amour, sa compréhension, ses sacrifices et sa présence rassurante tout au long de ce parcours exigeant.

À mon petit-fils **Yahia Taim Allah**, lumière de ma vie, dont le sourire m'a souvent redonné courage et espoir.

À toute ma famille, avec amour et reconnaissance infinie.
Cette thèse est le fruit de votre présence dans ma vie.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GENERALE

Le blé dur (*Triticum durum* Desf.) est une culture céréalière stratégique pour les pays de la Méditerranée, du Moyen-Orient et de l’Afrique du Nord, dont l’Algérie. Il constitue la base alimentaire de millions de personnes, notamment sous forme de semoule et de produits dérivés comme les pâtes, le couscous ou le pain traditionnel. La culture du blé dur revêt une importance économique, sociale et stratégique dans le contexte actuel de sécurité alimentaire. En Algérie, il occupe environ 54 % des surfaces céréaliers (Henni M, 2022), majoritairement implantées dans les zones semi-arides des hauts plateaux, où les conditions climatiques limitent sévèrement son rendement et sa stabilité.

Historiquement implanté depuis l’Antiquité, le blé dur s’est adapté à une grande diversité d’écosystèmes, mais reste très sensible aux aléas environnementaux. En particulier, les zones semi-arides présentent un ensemble de contraintes qui entravent fortement le potentiel productif du blé dur (Othmani et al., 2021). Ces contraintes comprennent la variabilité interannuelle des précipitations, les températures extrêmes, les épisodes de gelées printanières, le stress hydrique en fin de cycle, ainsi que les effets combinés du réchauffement climatique. Ces facteurs environnementaux abiotiques sont responsables non seulement d’une baisse de la productivité, mais aussi d’une dégradation de la qualité technologique des grains (Hutsch et al., 2019).

La productivité du blé dur dans les hauts plateaux algériens demeure très en deçà du potentiel génétique des variétés cultivées. Alors que certaines études indiquent des rendements potentiels supérieurs à 4 t/ha dans des conditions contrôlées (Guendouz et al., 2012), les rendements obtenus sur le terrain oscillent souvent entre 0,8 et 1,5 t/ha selon les campagnes (Khris, 2021). Ce faible rendement est aggravé par des pertes de récolte liées à un certain nombre de facteurs techniques et climatiques, notamment le retard de récolte et les mauvaises performances des moissonneuses-batteuses (Parvej et al., 2020).

En effet, la période de récolte constitue une phase critique du cycle cultural. Une récolte tardive, souvent causée par des contraintes techniques (manque de main-d’œuvre, indisponibilité du matériel, aléas météorologiques), expose les grains à des pertes quantitatives et qualitatives considérables : chute de grains au sol, augmentation du mitadinage, baisse du poids spécifique, germination sur pied, altération du gluten (Figueiredo et al., 2013). De plus, des réglages inadaptés de la moissonneuse-batteuse aggravent ces pertes mécaniques, qui peuvent atteindre jusqu’à 15 à 20 % du rendement final (Lipinski et al., 2013).

Au regard de ces observations, il apparaît crucial de mieux comprendre les interactions entre les facteurs agro-climatiques, physiologiques et techniques qui influencent la productivité réelle du blé dur. Cette compréhension passe par une analyse fine du comportement de différents génotypes dans des conditions agro-climatiques contrastées, et par une évaluation rigoureuse des pertes associées à la phase de récolte.

Les progrès récents en sélection variétale ont permis l'introduction de génotypes présentant une meilleure tolérance aux stress abiotiques. Cependant, leur performance reste fortement conditionnée par leur interaction avec l'environnement ($G \times E$). Une évaluation pluriannuelle et multisite de ces génotypes permet d'identifier les plus stables, c'est-à-dire ceux dont les performances varient peu d'une année à l'autre, ou d'un site à l'autre.

Par ailleurs, l'étude des paramètres morpho-phéno-physiologiques tels que la précocité, la surface foliaire, la température du couvert végétal, la stabilité membranaire, ou encore la teneur relative en eau, apporte des informations précieuses sur les mécanismes d'adaptation mis en place par les plantes. Ces caractères sont d'autant plus importants qu'ils influencent directement des composantes du rendement telles que le nombre d'épis/m², le nombre de grains/épi, ou le poids de mille grains. À cela s'ajoute l'analyse du remplissage des grains, phase décisive pour la constitution du rendement final, particulièrement sensible au stress thermique et hydrique post-floraison.

La présente recherche s'inscrit dans une double perspective : d'une part, identifier les génotypes de blé dur les plus performants en conditions semi-arides sur la base d'un ensemble de critères agro-physiologiques ; d'autre part, évaluer l'importance des pertes de rendement liées au processus de récolte, en tenant compte tant du calendrier (précocité ou retard de récolte) que des pertes mécaniques engendrées par la moissonneuse-batteuse.

Les objectifs principaux de cette étude sont donc d'évaluer le comportement agro-morpho-physiologique de différents génotypes de blé dur dans plusieurs sites représentatifs de la zone semi-aride des hauts plateaux algériens, sur deux campagnes culturales ; d'analyser la contribution relative des caractères phéno-morpho-physiologiques à la variation du rendement en grain ; d'étudier la dynamique de remplissage des grains en relation avec les conditions climatiques et physiologiques afin de mieux comprendre les déterminants du poids de mille grains ; enfin, de quantifier les pertes de récolte, tant qualitatives que quantitatives, induites par le retard de récolte ainsi que par les mauvais réglages de la moissonneuse-batteuse.

CHAPITRE I

ETUDE

BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre I : Revue bibliographique

1. Historique et origine du blé dur

Le terme « blé » trouve son origine dans le mot gaulois *Blato*, qui a évolué en ancien français sous les formes *blaie*, *blee* ou *blaier*. Il désigne plusieurs espèces appartenant au genre *Triticum* (Henry et Beyser, 2000). Depuis les débuts de l'agriculture, cette céréale constitue un aliment de base pour l'humanité (Ruel, 2006). Le blé fait partie des premières plantes récoltées et cultivées dans le Croissant fertile – une région qui englobe la Syrie, la Palestine, l'Irak ainsi qu'une grande portion de l'Iran – il y a environ 7000 à 10 000 ans (Croston et Williams, 1981). D'après Thomas (1975), des vestiges archéobotaniques de blé diploïde et tétraploïde, datant de plus de 7000 ans avant notre ère, ont été mis au jour dans des sites du Proche-Orient.

En Afrique du Nord, notamment en Algérie, l'introduction du blé dur est souvent associée à l'époque de la conquête arabe. De nombreux auteurs s'accordent à dire que depuis cette période, la culture céréalière – principalement axée sur le blé dur – s'est largement implantée dans la région (Erroux et Laumont, 1961).

2. Origine génétique

Sur le plan génétique, le blé résulte de croisements naturels entre des espèces sauvages telles que *Triticum monococcum* et une graminée appelée *Aegilops speltoides*. Le génome transmis par *T. monococcum* est désigné par la lettre A, tandis que celui provenant d'*Aegilops* est noté B. Ainsi, le blé dur, *Triticum durum*, possède une composition chromosomique de type AABB. Chaque chromosome du génome A a un homologue correspondant dans le génome B, avec lequel il partage une forte proximité (Dubcovsky et Dvorak, 2007).

Grâce à l'hybridation naturelle, un ancêtre sauvage appelé *Triticum turgidum* ssp. *dicoccoides* est apparu. Celui-ci a évolué d'abord vers *T. turgidum* ssp. *dicoccum*, puis vers la forme cultivée, *Triticum durum*. Cette dernière est une espèce allotétrapiode comportant 28 chromosomes ($2n = 4x = 28$), organisés en deux séries homologues A et B, chacune contenant 7 chromosomes de base (Feillet, 2000). En Algérie, les espèces de blé les plus couramment cultivées sont *Triticum aestivum* L. (blé tendre) et *Triticum durum* Desf. (Blé dur) (Bourouh et al., 2023).

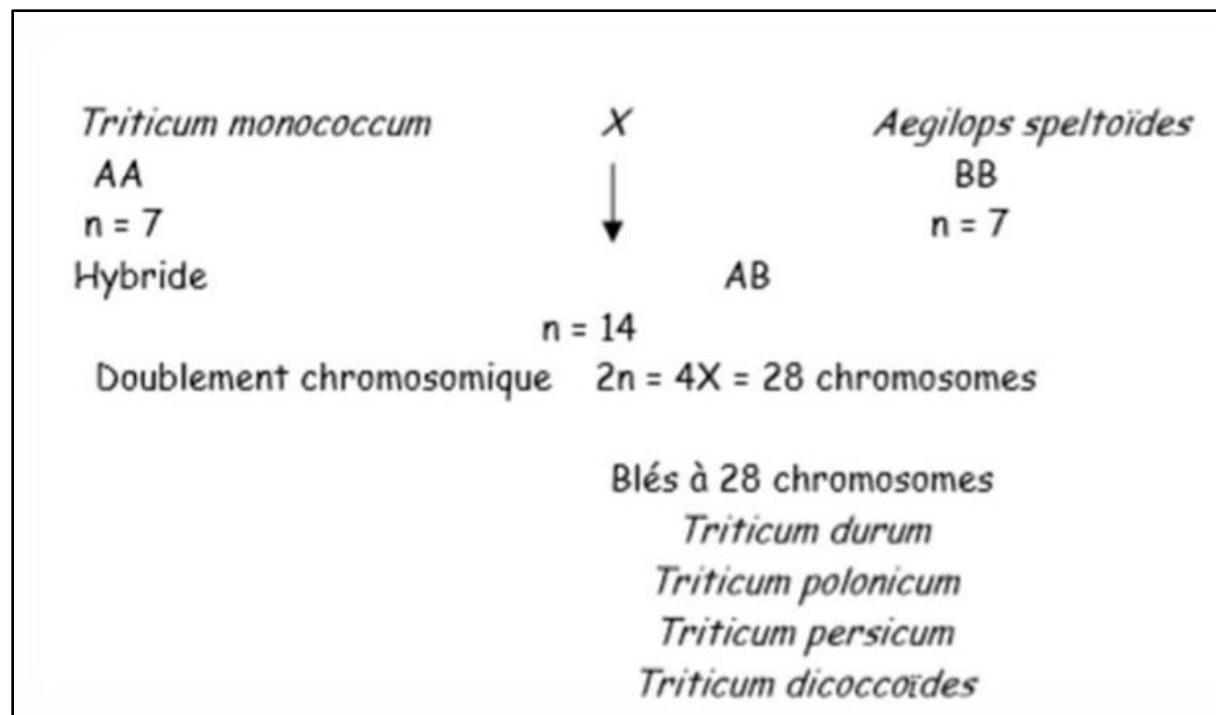


Figure 1: Origine et évolution génétique du blé dur (*Triticum durum Desf.*) (Schuhwerk, et al., 2011).

3. Taxonomie du blé dur

Le blé dur (*Triticum turgidum* subsp. *durum*) est une espèce monocotylédone à graines (spermatophyte), faisant partie de la famille des **Poaceae**, également appelée graminées. Sa classification botanique, établie notamment par Angiosperm Phylogeny Group (2016), le situe dans le genre *Triticum*, au sein du groupe des blés tétraploïdes :

Règne :	Plantae
Clade :	Angiospermes (ou Magnoliophyta)
Clade :	Monocotylédones (Monocots)
Ordre :	Poales
Famille :	Poaceae (les graminées)
Sous-famille :	Pooideae
Tribu :	Triticeae
Genre :	<i>Triticum</i>
Espèce :	<i>Triticum durum</i> Desf.

4. Morphologie générale du blé

Le blé est une plante annuelle de la famille des graminées, à port herbacé. Sa hauteur

varie selon les variétés, avec une moyenne avoisinante 1 mètre. Sa tige, de forme cylindrique, est généralement lisse et creuse entre les nœuds, bien que certaines variétés puissent présenter des tiges pleines. Les feuilles, alternes et disposées en deux rangs, sont simples, entières et insérées le long de la tige (Figure 2) (Soltner, 1998).

Chaque feuille est constituée d'une gaine qui enserre la tige, prolongée par un limbe étroit à nervures parallèles et se terminant par une pointe. À la jonction entre la gaine et le limbe se trouve une fine ligule membraneuse, accompagnée de deux petits appendices latéraux appelés oreillettes (Soltner, 1998).

Le système racinaire du blé comprend d'abord des racines séminales, qui apparaissent dès la levée à partir de la plantule. Celles-ci sont progressivement complétées par des racines adventives, formées à partir des nœuds basaux de la tige, constituant ainsi le système racinaire définitif (Cornec, 2008).

5. Description de l'inflorescence et de la fleur du blé

L'inflorescence du blé se présente sous la forme d'un épis terminal, composé d'épillets sessiles qui se disposent individuellement le long d'un axe central appelé rachis. Chaque épillet est constitué de deux glumes, qui sont des bractées protectrices, abritant entre deux et cinq fleurs disposées en rangées (distiques) sur une petite branche appelée rachéole.

Les fleurs du blé, dites parfaites, sont enveloppées par deux structures bractéiformes : la glumelle inférieure, appelée lemme, et la glumelle supérieure, appelée paléa. Chaque fleur comprend trois étamines munies d'anthères biloculaires ainsi qu'un pistil doté de deux styles terminés par des stigmates plumeux, favorisant la capture du pollen (Soltner, 1998).

Le blé est une plante autogame, ce qui signifie que la pollinisation s'effectue principalement au sein de la même fleur, le pollen fécondant l'ovaire de sa propre fleur. À maturité, le grain de pollen, de forme fusiforme, contient typiquement trois noyaux. Chaque fleur peut donner naissance à un fruit unique, appelé caryopse, qui renferme une seule graine. Cette graine est composée d'un endosperme volumineux qui constitue la réserve nutritive, ainsi que d'un embryon aplati localisé à l'extrémité supérieure de la graine, proche de la base florale (Figure 7) (Soltner, 1998).

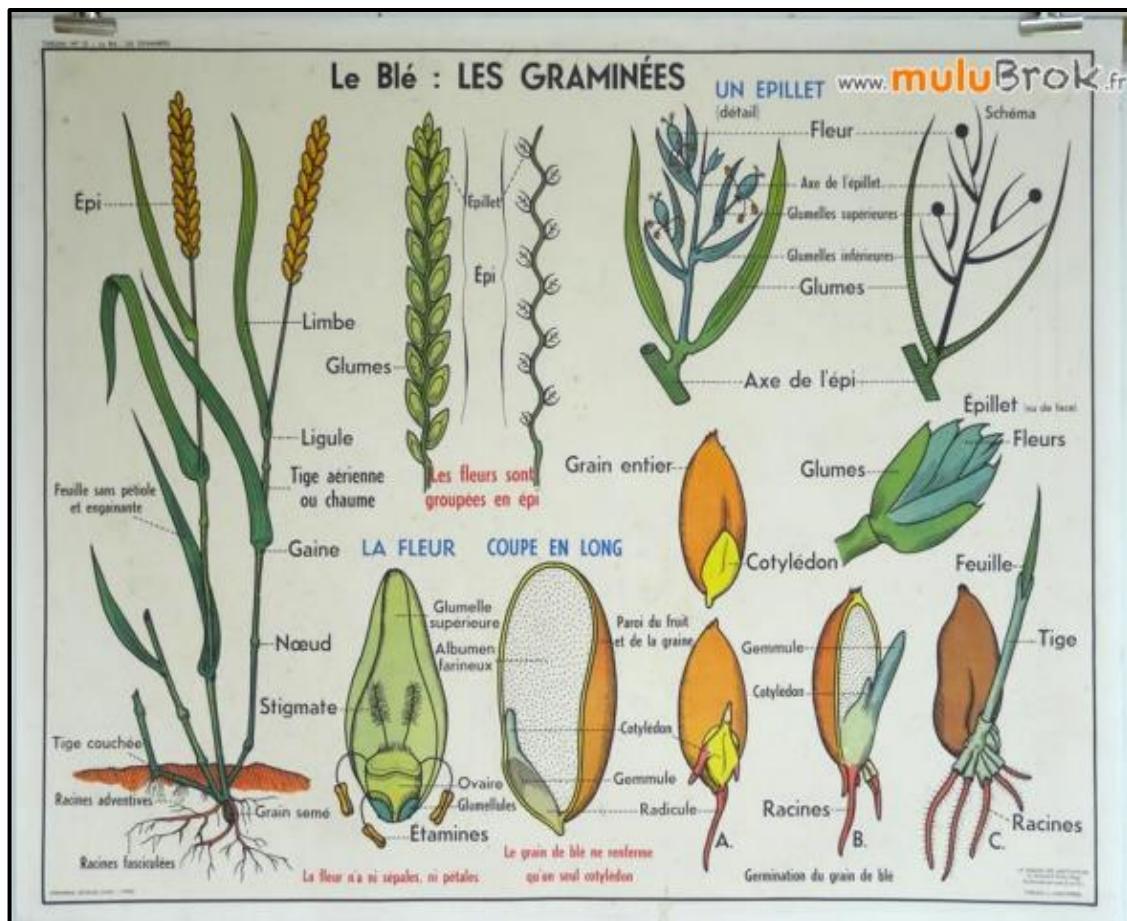


Figure 2: Description de la plante de blé (Mulubrok, 2019).

6. État actuel du rendement du blé dur

6.1 Rendement mondial

Le blé dur est actuellement le dixième type de céréale le plus cultivé à l'échelle mondiale en termes de production (Broccanello et al., 2023). Parmi les différentes variétés de blé, il occupe la seconde place derrière le blé tendre (Marti et Slafer, 2014). La production annuelle mondiale de blé dur oscille entre 35 et 40 millions de tonnes (Xynias et al., 2020), ce qui représente environ 7 % de la production totale de blé (Broccanello et al., 2023). Cette proportion a diminué de manière progressive depuis le 19e siècle, époque à laquelle le blé dur représentait environ 14 à 16 % de la production mondiale totale (Martínez-Moreno et al., 2022).

Actuellement, le principal producteur mondial de blé dur est le Canada, avec une production annuelle avoisinant les 5,2 millions de tonnes. L'Italie et la Turquie suivent avec des productions respectives de 4,3 et 3,7 millions de tonnes (Xynias et al., 2020). En ce qui concerne les superficies cultivées, le blé dur couvre environ 18 millions d'hectares dans le monde, soit entre 8 et 10 % des terres dédiées à la culture du blé (De Vita et Taranto, 2019). Les principales zones de production se situent autour du bassin méditerranéen, dans les Grandes

Plaines nord-américaines, ainsi qu'en Asie de l'Ouest et en Asie centrale. Les pays possédant les plus grandes superficies cultivées en blé dur sont notamment le Canada, le Kazakhstan, l'Algérie, l'Italie et la Turquie (Martínez-Moreno et al., 2022). D'autres régions de production plus modestes existent également, notamment au Mexique et en Australie (Mccallum et al., 2019). En Afrique subsaharienne, l'Éthiopie est le principal pays producteur (Sall et al., 2019). Par ailleurs, en raison du changement climatique, la répartition géographique du blé dur tend à évoluer, avec une extension vers certaines régions de l'Europe centrale et orientale, comme la Pologne (Bozek et al., 2021).

La productivité est généralement évaluée en fonction du rendement à l'hectare, un indicateur fortement influencé par les conditions climatiques et géographiques (Sabella et al., 2020). Au cours des dix dernières années, les principaux producteurs européens, à savoir l'Italie et la Turquie, ont enregistré des rendements moyens annuels variant entre 3,1 et 3,8 tonnes/ha et entre 2,6 et 3,2 tonnes/ha, respectivement.

Enfin, il est important de souligner que les principaux pays producteurs ne sont pas nécessairement les plus grands consommateurs. Les pays du bassin méditerranéen notamment l'Italie, l'Algérie, la Tunisie et la Turquie figurent parmi les plus gros consommateurs de blé dur (Sabella et al., 2020). Celui-ci est en effet très apprécié pour ses qualités nutritionnelles, apportant protéines, glucides, fibres, calcium, zinc et lipides (Pour-Aboughadareh et al., 2020). Il se distingue également par sa couleur jaune intense, la dureté de ses grains, son goût particulier de noisette, ainsi que sa teneur élevée en protéines pouvant atteindre jusqu'à 18 % du poids du grain (Monneveux et al., 2012). Pour plus d'un milliard de personnes vivant dans la pauvreté, le blé dur constitue une source alimentaire de base, couvrant entre 20 et 50 % de leurs apports caloriques quotidiens et environ 20 % de leurs besoins en protéines (Broccanello et al., 2023).

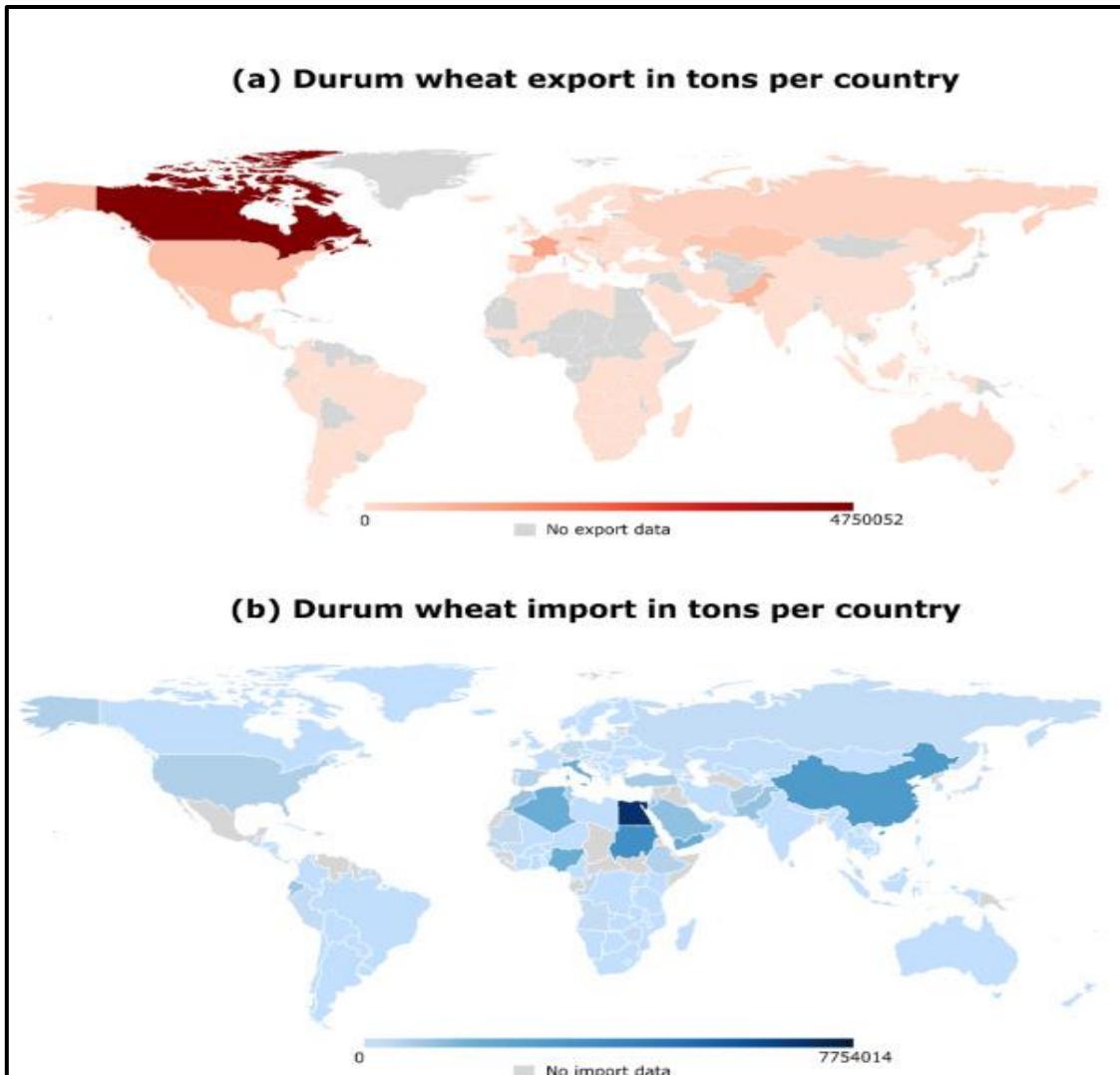


Figure 3: (a) Quantité moyenne annuelle d'exportation de blé dur et (b) quantité moyenne annuelle d'importation de blé dur, en tonnes par pays (2017–2021), d'après les données WITS (Mendes et al., 2022), cartographiées avec QGIS.

Flux mondiaux de blé dur

En examinant de plus près les flux commerciaux entre pays, le Canada apparaît comme le principal exportateur mondial de blé dur (Figure 3a), avec une moyenne annuelle de 4,75 millions de tonnes exportées pour une valeur commerciale d'environ 1,29 milliard de dollars américains entre 2017 et 2021 (WITS, 2023). En 2021, les principales destinations du blé dur canadien étaient l'Algérie, l'Italie et le Maroc (Grosse-Heilmann et al., 2024). Durant la même période, la France et la République tchèque occupaient respectivement la deuxième et la troisième place parmi les exportateurs. Cependant, en 2021, la Grèce a surpassé ces deux pays avec une valeur commerciale de 415 millions USD, devenant ainsi le deuxième plus grand exportateur derrière le Canada (WITS, 2023).

Du côté des importations (Figure 3b), le continent africain regroupe les plus grands

importateurs de blé dur. Chaque année, les pays africains importent pour plus de 5,31 milliards USD de blé dur (Sall et al., 2019).

6.2 En Algérie

6.2.1 La production céréalière en Algérie

D'après les données fournies par la Direction des Systèmes d'Information, des Statistiques et de la Prospective (2019), l'Algérie couvre une superficie totale de 238 millions d'hectares, dont près de 191 millions sont occupés par le Sahara. La surface dédiée à l'agriculture représente environ 18,5 % de cette superficie globale. Toutefois, la surface agricole réellement exploitée (SAU) est évaluée à 8,50 millions d'hectares (Selt, 2025), avec environ 4,8 millions d'hectares consacrés aux cultures herbacées. Parmi celles-ci, les céréales occupent une place prépondérante, notamment dans les régions arides et semi-arides. La superficie consacrée à la culture du blé tendre et du blé dur varie généralement entre 2 et 2,5 millions d'hectares (Cheriet, 2021).

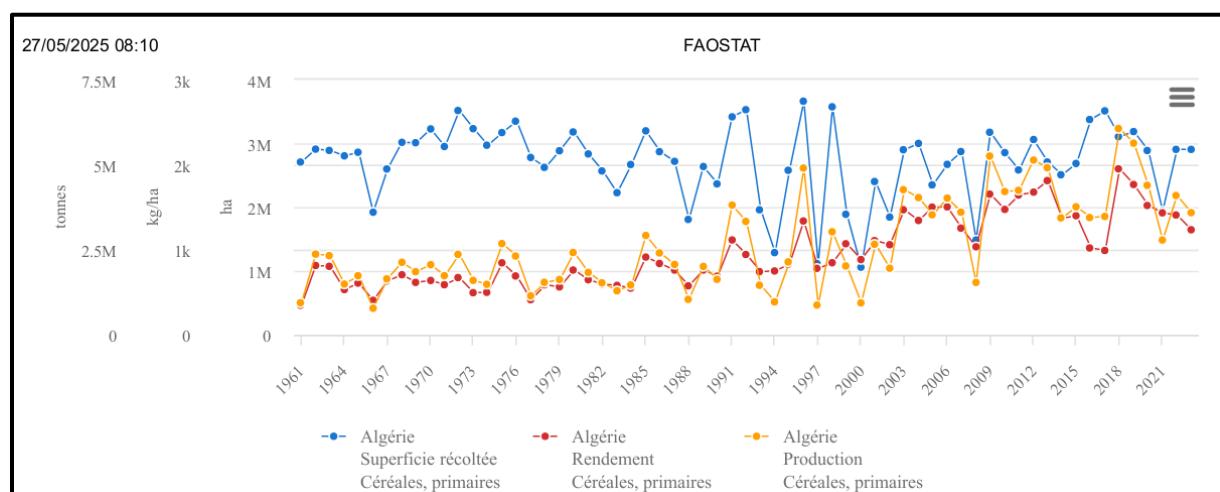


Figure 4: Production totale de céréales en Algérie (1961–2023) (FAOSTAT, 2025).

Pour la campagne agricole 2023/2024, la production nationale de blé est estimée à environ 2,7 millions de tonnes, marquant une baisse par rapport à la saison précédente (2022/2023), durant laquelle la production avait atteint en moyenne 3,7 millions de tonnes (Reidy, 2024) (Figure 5). En Algérie, la production céréalière varie fortement d'une année à l'autre en raison de la dépendance aux conditions climatiques, affectant ainsi les superficies cultivées, les rendements et la production globale. FAO (2024) souligne que ces fluctuations sont principalement dues à l'irrégularité des précipitations ainsi qu'à leur mauvaise répartition saisonnière.

Pour combler le déficit de production, le pays a recours à l'importation de blé,

principalement en provenance de la France, des États-Unis, du Canada et de l'Argentine, qui figurent parmi les principaux fournisseurs (Rahal et Tahri , 2022).

L'Algérie affiche une consommation annuelle moyenne de 11 millions de tonnes de blé, ce qui en fait le deuxième pays consommateur en Afrique du Nord, après l'Égypte. Incapable de satisfaire la demande intérieure, le pays dépend largement des importations. Selon le rapport de USDA (2024), les importations de blé pour la campagne 2023/2024 sont estimées à environ 8,7 millions de tonnes, soit une hausse de 7,4 % par rapport à la campagne précédente.

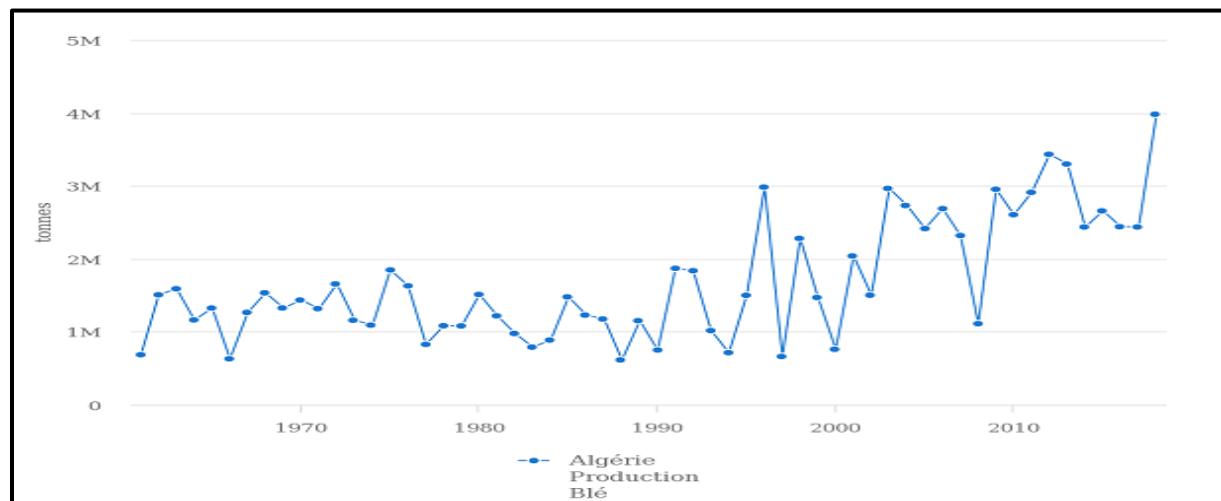


Figure 5: Évolution de la production de blé en Algérie entre 1963 et 2019 (FAOSTAT, 2020)

6.2.2 Caractéristiques climatiques des hauts plateaux algériens

Le territoire algérien se distingue par trois zones climatiques très différentes :

- ✓ **Le Sahara**, une région désertique où les précipitations annuelles moyennes sont inférieures à 100 mm, caractérisant un climat extrêmement aride.
- ✓ **Le littoral et les massifs montagneux**, qui connaissent un climat méditerranéen marqué par des pluies intenses en hiver, responsables d'une forte érosion. En été, les précipitations deviennent très rares tandis que les températures atteignent des niveaux élevés. Les précipitations sur les reliefs peuvent atteindre jusqu'à 1600 mm par an, mais elles sont inégales et variables d'une année à l'autre.
- ✓ **Les hauts plateaux**, qui représentent environ 9 % de la superficie nationale, comprenant 5 millions d'hectares de terres cultivables, présentent un climat semi-aride avec des précipitations comprises entre 100 et 400 mm par an (FAO, 2015).

Ces hauts plateaux, qui abritent plus de 80 % des cultures céréalières en Algérie, subissent une triple influence : celle de l'Atlas tellien, qui limite les pluies hivernales, celle de

l'Atlas saharien et du désert du Sahara, ainsi que celle de l'altitude, responsable de gelées tardives (Beauval, 2017).

Selon Dalila et *al.*, (2021), les principales contraintes climatiques affectant la production céréalière dans cette région sont :

- La variabilité des précipitations à l'automne, qui engendre des risques de sécheresse nuisant à la germination et à la levée des plants, ainsi que des orages violents pouvant compliquer ou retarder les semis.
- Les basses températures hivernales, notamment en altitude, avec des minima pouvant atteindre -10 °C en abri, et allant jusqu'à -15 °C au niveau des feuilles.
- L'irrégularité des pluies printanières, qui provoque des déficits en eau durant des phases cruciales du développement des céréales (fin tallage et début montaison), limitant la formation des épillets, le développement des organes reproducteurs, des tiges et des feuilles. Les déficits hydriques après la floraison sont également très préjudiciables à la formation des grains.
- Les gelées printanières, pouvant atteindre entre -2 °C et -3 °C sous abri, et jusqu'à -6 °C à -8 °C au niveau du feuillage, détruisent les apex en cours de différenciation. Dans certaines zones, le risque de gelées persiste jusqu'à la floraison.
- Enfin, les stress hydriques et les épisodes de chaleur excessive post-floraison limitent le remplissage des grains et entraînent un phénomène d'échaudage.

7. Contraintes abiotiques et impacts sur la culture du blé dur

L'amélioration génétique du blé dur destiné aux régions arides s'appuie principalement sur la sélection de variétés capables de mieux résister aux stress abiotiques, afin de mieux s'adapter aux fluctuations des conditions de production (Benchikh et *al.*, 2025). Tout au long de son développement, le blé est confronté à plusieurs contraintes environnementales qui affectent de façon variable son potentiel de rendement. En zones semi-arides, la variation des rendements est largement liée à l'influence de ces facteurs abiotiques (Mehalaine et Chenchouni, 2021).

7.1 L'éclairement

La lumière constitue la source énergétique fondamentale pour la plante, nécessaire à la fixation du dioxyde de carbone atmosphérique et à la synthèse des glucides par photosynthèse (Maamri, 2019). Cependant, un éclairement inadapté (qu'il soit insuffisant ou excessif) peut devenir une cause de stress pour la plante. En effet, une luminosité trop intense peut provoquer

une photosensibilisation, un phénomène néfaste pour la santé de la plante (Nishiyama et *al.*, 2006). Dans le contexte spécifique des hautes plaines, c'est surtout l'excès de lumière qui génère un stress, en entraînant une inhibition photosynthétique des centres réactionnels des photosystèmes (Sharma et Singh, 2023).

7.2 La température

Le blé dur, comme toute plante, possède une plage de températures optimales pour son développement. Lorsque les températures dépassent ces valeurs optimales, la croissance de la plante est compromise, avec une intensité d'effet proportionnelle à l'écart par rapport à cette plage (Orlando et *al.*, 2023). La température influence de façon continue le développement végétatif, jouant un rôle essentiel dans l'absorption des nutriments, le processus photosynthétique, l'accumulation de matière sèche et la transition entre les différentes phases de croissance (Zhang et *al.*, 2023).

7.2.1 Les températures basses : effets sur le blé

La sensibilité du blé aux basses températures varie selon les stades de développement de la plante. En début de cycle, les températures hivernales peuvent ralentir la croissance des génotypes vulnérables, tout en étant indispensables à l'induction florale des variétés à vernalisation (Ji et *al.*, 2017). Lorsque ces températures froides surviennent tardivement au printemps, notamment au stade de la méiose, elles peuvent endommager les organes reproducteurs, notamment en provoquant la stérilité des grains de pollen et des ovaires (Zhang et *al.*, 2019).

Dans le bassin méditerranéen, les variétés de blé cultivées sont généralement semi-alternatives. Leur floraison tardive constitue un mécanisme d'évitement des gelées printanières. Toutefois, l'introduction de cultivars de printemps, peu sensibles à la photopériode et ayant des exigences réduites en vernalisation, s'est révélée risquée dans les hautes plaines orientales, car les températures hivernales plus douces y favorisent une montaison précoce (Mekhlouf et *al.*, 2006).

Pennington et Falor (2023) ont signalé des dommages importants sur blé tendre exposé à environ 0,3 °C au moment de l'épiaison. Hussain et *al.*, (2018) note également que des températures avoisinantes +6 °C peuvent affecter négativement la formation des grains de pollen. Pendant la phase de montaison, des températures comprises entre -5 °C et +3 °C peuvent altérer la croissance, provoquer la destruction des jeunes feuilles et même entraîner la perte des tiges si les conditions sont sévères.

7.2.2 Les températures élevées (Stress thermique)

Le stress thermique se caractérise généralement par une élévation de la température au-delà d'un certain seuil, et ce, pendant une durée suffisante pour provoquer des dégâts irréversibles affectant la croissance et le développement des plantes (Hu et al., 2020). Le blé est particulièrement vulnérable à des températures élevées, notamment durant la phase critique de l'anthèse, période durant laquelle sa capacité de récupération est limitée (Yadav et al., 2022). Une chaleur excessive perturbe divers processus physiologiques, biologiques et biochimiques essentiels chez cette culture (Bannayan et Eyshi et al., 2014). Par ailleurs, un stress thermique peut entraîner chez le blé une germination déficiente des graines, un raccourcissement de la durée de remplissage des grains, une baisse du nombre de grains produits, ainsi qu'une diminution de la photosynthèse et de la translocation des assimilats (Bhattarai et al., 2022). De plus, les hautes températures compromettent la fonctionnalité des protéines et modifient la fluidité des lipides membranaires, ce qui affecte l'activité enzymatique des chloroplastes et mitochondries, ainsi que la stabilité des membranes cellulaires. Une exposition prolongée à des températures élevées, ou un stress thermique intense, peut conduire à des lésions cellulaires graves voire à la mort des cellules (Hu et al., 2020).

7.2.3 Stress hydrique

Les performances de rendement du blé dur (*Triticum durum* Desf.) dans les hauts plateaux algériens sont fortement restreintes par divers stress abiotiques, la sécheresse étant la contrainte la plus déterminante (Bouchemal et Djekoun, 2018). Il est en effet rare de rencontrer un milieu totalement exempt de stress, ce qui limite le potentiel productif maximal. Parmi ces contraintes, le déficit en eau exerce l'impact négatif le plus marqué sur la production agricole. Ce phénomène constitue une problématique majeure pour la culture céréalière dans de nombreuses zones, notamment arides et semi-arides, où la fréquence et l'intensité des épisodes de sécheresse ont tendance à s'accroître selon les projections climatiques actuelles (Ladoui et al., 2020). Le stress hydrique résulte d'un manque prolongé de précipitations par rapport à la normale sur une période donnée, engendrant un déséquilibre entre les besoins en eau des plantes et la disponibilité réelle dans le sol (Kara, 2015).

Les effets du déficit hydrique se manifestent par une série de modifications touchant la croissance, ainsi que les caractéristiques morphologiques, physiologiques et biochimiques des plantes (Chahbar et Belkhodja, 2016). Ces altérations apparaissent d'abord au niveau des feuilles, puis s'étendent progressivement à la tige et au système racinaire (Hacini, 2014). Selon Benmhammed et al. (2008), la réduction de l'apport en eau influence de manière significative

les composants du rendement. Elle affecte également indirectement la plante par la diminution de la nutrition minérale, l'augmentation de la salinité du sol, ainsi que par une résistance mécanique accrue du sol, limitant le développement racinaire (Sebbane, 2021).

En situation de stress hydrique, le rapport entre la biomasse des racines et celle des tiges tend à s'accroître, en raison d'une allocation préférentielle des ressources vers le système racinaire au détriment de la partie aérienne. Par ailleurs, le déficit en eau compromet l'intégrité des membranes plasmatiques, réduit la teneur en chlorophylle et diminue l'activité photosynthétique (Sun et al., 2020). Wang et al, (2023) expliquent que sous déficit hydrique, la croissance des plantes ralentit et la fermeture plus ou moins rapide des stomates limite l'assimilation du carbone, freinant ainsi le développement.

Le tallage constitue un paramètre essentiel dans la détermination du rendement des céréales. Une carence hydrique précoce, durant la phase végétative, réduit à la fois le nombre et la taille des talles chez le blé. Plus tard, après la fécondation, le stress hydrique entraîne une diminution de la taille des organes reproducteurs. Si ce déficit persiste durant le remplissage des grains, il altère leur composition et diminue le poids de mille grains en affectant la durée et la vitesse de ce remplissage (Saeidi et al., 2015).

L'importance de l'effet du stress dépend de sa durée et de son intensité (Figure 6). Lorsque le déficit hydrique se prolonge et que la teneur en eau du sol atteint le point de flétrissement permanent, la survie de la plante est menacée (Mosa et al., 2017). Cependant, les plantes possèdent des mécanismes de tolérance à la sécheresse, qui s'exercent à différents niveaux, depuis la cellule jusqu'à l'organisme complet. Ces mécanismes, communs à diverses espèces mais avec des degrés d'expression variables, permettent d'atténuer les impacts du stress (Adjabi, 2011). La réponse des plantes à la sécheresse varie selon le génotype, la durée et la gravité du stress, ainsi que le stade de développement (Nezhadahmadi et al., 2013). Ces adaptations engendrent des changements phénologiques, morphologiques, physiologiques et biochimiques qui interagissent pour assurer la croissance, le développement et la production.

Les stratégies adoptées par les plantes pour faire face au déficit hydrique peuvent être écologiques ou physiologiques (Akıncı et Losel, 2012). En fonction de la sévérité et de la durée du stress, les réponses peuvent être temporaires, telles que la fermeture des stomates ou l'ajustement osmotique, ou plus durables, incluant des modifications morphologiques et anatomiques permettant une meilleure tolérance (Tardieu et al., 2018).

Enfin, les génotypes tolérants à la sécheresse sont capables de supporter plus efficacement le stress hydrique et de récupérer plus rapidement après réhydratation, contrairement aux génotypes sensibles. Toutefois, cette capacité dépend étroitement de la sévérité du stress subi.

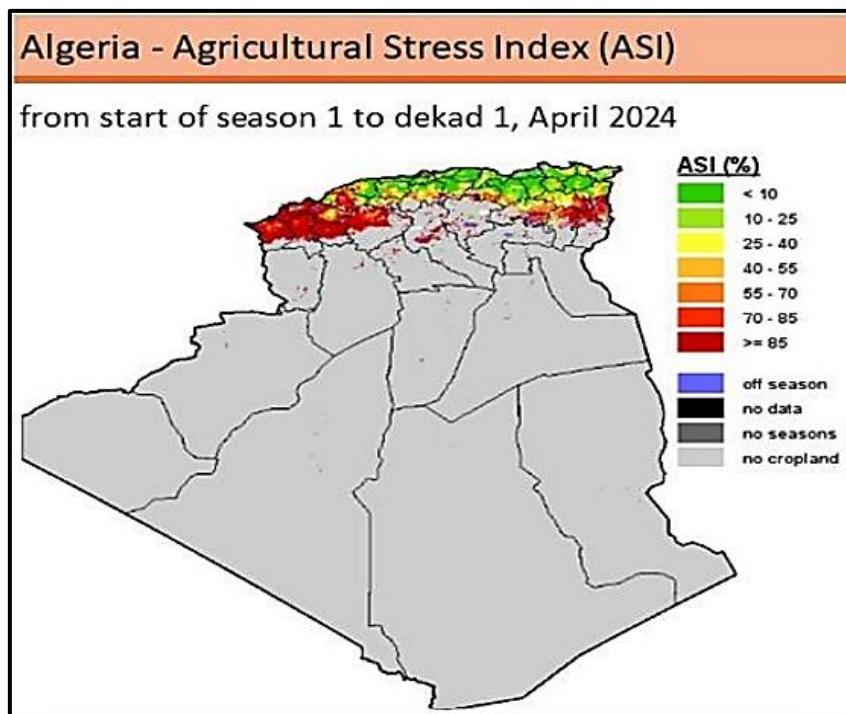


Figure 6: Indice de Stress Agricole (ASI) en Algérie (FAO, 2024).

8. Paramètres de sélection variétale du blé dur face aux contraintes abiotiques

8.1 Critères phénologiques

La phénologie se rapporte aux étapes successives de développement d'une plante, influencées par les conditions environnementales. Dans les programmes d'amélioration génétique, une stratégie couramment adoptée pour atténuer l'impact des stress abiotiques, notamment la sécheresse, consiste à réduire la durée du cycle de vie des plantes. Certaines variétés parviennent à boucler leur développement avant que les conditions climatiques ne deviennent défavorables, en particulier en évitant les périodes de déficit hydrique (Mzabri et al., 2017). Ainsi, la précocité constitue un mécanisme d'évitement face à la sécheresse de fin de cycle. À l'inverse, la maturité tardive peut exposer les cultures à des risques accrus de sécheresse et à des températures élevées durant les stades critiques du développement (Rabti, 2020). Farooq et al, (2012) soulignent que des conditions de faible disponibilité en eau peuvent induire un raccourcissement du cycle végétatif chez certaines cultures, notamment le blé et l'orge. Toutefois, une précocité excessive peut s'avérer contre-productive dans les régions où

des gelées tardives sont fréquentes, compromettant ainsi la stabilité du rendement en grains (Mekhlouf et *al.*, 2006).

8.2 Critères morphologiques

Les stress abiotiques entraînent souvent des changements notables dans la structure morphologique et anatomique des plantes. Ces modifications incluent, entre autres, une réduction de la taille des feuilles, une baisse du nombre de stomates, un épaississement des parois cellulaires foliaires, une cutinisation accrue, un développement inadéquat des tissus conducteurs, ainsi qu'une sénescence prématuée. Un système racinaire robuste et profondément ancré joue un rôle essentiel dans l'absorption de l'eau et des nutriments (Fakhri et *al.*, 2016). Face au stress hydrique, les plantes tendent à allonger leurs racines pour capter l'humidité disponible en profondeur (Tumová et *al.*, 2018). Par ailleurs, la surface foliaire influe directement sur les pertes en eau par transpiration ainsi que sur l'absorption du carbone via la photosynthèse (Benmohammed et *al.*, 2008). La réduction de cette surface constitue une stratégie de survie pour limiter les besoins hydriques. Le phénomène de l'enroulement foliaire, observé chez plusieurs espèces telles que le riz, le maïs, le blé et le sorgho, est considéré comme une réponse adaptative typique aux contraintes environnementales (Kadioglu et *al.*, 2012). En complément, Tan et *al.* (2023) signalent que le stress accélère la sénescence des feuilles, affectant la performance photosynthétique et réduisant à la fois le rendement et la qualité.

8.3 Critères physiologiques

L'évaluation de la tolérance physiologique permet d'identifier les génotypes capables de maintenir une productivité acceptable en conditions de stress, grâce à leur potentiel génétique (Benderradj et *al.*, 2021). Les génotypes diffèrent par leur efficacité photosynthétique, qui peut être altérée par le stress via la réduction de la surface foliaire et de l'activité des feuilles, en raison de la fermeture stomatique ou de perturbations internes (Yang et *al.*, 2021). Pour se protéger, les plantes activent divers mécanismes comme la dissipation thermique, les cycles antioxydants, le cycle des xanthophylles, ou encore la déconnexion des antennes collectrices de lumière des centres réactionnels de la photosynthèse (Basu et *al.*, 2016).

La teneur relative en eau (TRE) est un indicateur clé du statut hydrique et de la tolérance à la sécheresse, influencée par l'absorption d'eau par les racines et la transpiration (Anjum et *al.*, 2011). En situation de stress hydrique, on observe une baisse significative de la TRE, de la turgescence, du potentiel hydrique foliaire et du taux de transpiration (Hussain et *al.*, 2018). Cette diminution provoque un assèchement des feuilles et une baisse du potentiel en eau. La

température foliaire joue également un rôle important dans le maintien du statut hydrique en condition de stress (Farooq et al., 2009).

Les génotypes tolérants sont ceux capables de limiter les pertes en eau par unité de surface et de temps, et de maintenir une bonne hydratation cellulaire, favorable à la croissance foliaire (Slama et al., 2018). La fermeture stomatique est l'un des premiers mécanismes de défense déclenchés pour préserver l'eau, reposant notamment sur la production d'espèces réactives de l'oxygène (ROS), stimulée par l'acide abscissique (ABA), via l'activation des NADPH oxydases membranaires. Ce système de signalisation régule les réponses moléculaires au stress hydrique en équilibrant la production et l'élimination des ROS. L'ABA, produite dans les racines en réponse aux contraintes environnementales, est transportée vers les parties aériennes via le xylème, où elle inhibe l'expansion foliaire et favorise la fermeture stomatique. Cette régulation est essentielle pour permettre à la plante de s'adapter à une faible disponibilité en eau (Wach et Skowron, 2022).

9. Le remplissage des grains : un critère clé pour la sélection variétale sous stress abiotiques

Le remplissage des grains constitue une phase critique du cycle reproductif des céréales, notamment du blé dur (*Triticum durum* Desf.), durant laquelle les assimilats produits par photosynthèse ou remobilisés des organes végétatifs sont transférés vers les grains en formation. Cette étape, hautement sensible aux stress abiotiques tels que la sécheresse et les températures élevées, conditionne directement le poids de mille grains, un composant essentiel du rendement final (Arjona et al., 2018).

La performance d'une variété sous stress est souvent liée à sa capacité à maintenir un bon remplissage des grains, même en conditions défavorables. Ainsi, les génotypes capables de prolonger la durée du remplissage ou d'accélérer le transfert d'assimilats dans un laps de temps réduit sous stress sont considérés comme plus tolérants (Teng et al., 2023). Plusieurs études ont montré que la sécheresse, lorsqu'elle survient en post-anthèse, réduit significativement le taux de remplissage, la durée effective de remplissage, ainsi que la taille finale du grain (Alghabari et Ihsan, 2018). En parallèle, la chaleur excessive perturbe la photosynthèse, accélère la sénescence foliaire et diminue la disponibilité des assimilats pour les grains, compromettant davantage leur développement (Qu et al., 2023).

La sélection variétale fondée sur la capacité à maintenir le remplissage des grains sous stress apparaît donc comme une stratégie d'adaptation prometteuse. Les variétés présentant un

bon maintien de la photosynthèse foliaire après la floraison (le phénomène de *stay-green*) ont montré une meilleure performance en conditions de déficit hydrique (Ali et al., 2023). De même, la remobilisation efficace des réserves carbonées stockées dans les tiges avant la floraison vers les grains devient cruciale lorsque la photosynthèse est altérée par le stress (Ferguson et al., 2021).

Par ailleurs, les recherches récentes s'intéressent à des paramètres physiologiques et biochimiques associés au remplissage des grains, comme la stabilité des enzymes impliquées dans le métabolisme des sucres, l'intégrité des chloroplastes durant le stress, ou encore la régulation hormonale, notamment par l'acide abscissique (ABA) (Mostafa et al., 2020). Ces avancées ouvrent la voie à l'identification de marqueurs phénotypiques ou moléculaires exploitables en sélection assistée.

Dans le contexte de l'amélioration du blé dur pour les régions arides et semi-arides comme les Hauts Plateaux algériens, intégrer le remplissage des grains comme critère de sélection revêt une importance particulière. Il permet de cibler des variétés non seulement plus productives, mais aussi plus résilientes face aux aléas climatiques, assurant une meilleure stabilité de rendement (Djoudi et al., 2023).

10. Paramètres de qualité technologique du grain de blé dur

10.1 Teneur en humidité : influence sur la conservation et la récolte

La teneur en humidité des grains de blé dur joue un rôle central dans la qualité technologique, la sécurité sanitaire et la valorisation économique de la récolte. Elle conditionne directement le moment optimal de moisson, la capacité de conservation, ainsi que le niveau de pertes pré et post-récolte. Il est généralement recommandé de récolter lorsque les grains atteignent une humidité comprise entre 16 % et 18 %, seuil qui permet d'assurer une bonne résistance mécanique des grains tout en limitant les pertes par brisures ou égrenage (Alt, 2018). En deçà de 13 %, les grains deviennent plus cassants, ce qui augmente considérablement les pertes physiques lors du battage et altère la qualité marchande du lot (Grain Canada, 2023). À l'inverse, une récolte trop précoce, lorsque les grains sont encore trop humides, peut favoriser le développement de moisissures (*Fusarium*, *Aspergillus*), entraînant des risques de production de mycotoxines et rendant les grains non conformes aux normes sanitaires (Agriclimat, 2018). Sur le plan économique, chaque point d'humidité excédentaire nécessite un séchage supplémentaire, impliquant des coûts énergétiques élevés, tandis qu'une humidité trop basse engendre des pertes de poids commercial au moment de la vente, réduisant le rendement

marchand (Yara, 2023). Par ailleurs, la stabilité du stockage exige que l'humidité des grains descende en dessous de 13 % pour empêcher toute élévation de température dans les silos, la germination ou la prolifération d'insectes (El Melki et al., 2023). La variabilité de cette teneur est fortement influencée par les conditions climatiques de fin de cycle, notamment la température, le vent, l'humidité relative, ainsi que par les caractéristiques génétiques du cultivar utilisé et la nature du sol. Ainsi, une gestion rigoureuse du calendrier de récolte, fondée sur le suivi de la teneur en humidité, constitue un levier essentiel pour préserver la qualité technologique du blé dur tout en minimisant les pertes qualitatives et quantitatives.

10.2 Teneur en protéines : lien avec la qualité du gluten et la transformation

La teneur en protéines constitue un critère fondamental de la qualité technologique du blé dur, en lien direct avec ses aptitudes à la transformation, notamment en semoulerie et en pastification. En effet, les protéines du grain, et plus particulièrement les fractions de glutenines et de gliadines, sont responsables de la formation du gluten, réseau viscoélastique déterminant pour la fermeté, l'élasticité et la tenue à la cuisson des produits finis comme les pâtes alimentaires (Grain Canada, 2023). Une teneur élevée en protéines, généralement supérieure à 12,5 %, est fortement recherchée par l'industrie car elle améliore le rendement en semoule, la qualité du gluten et la stabilité du produit transformé (Yara, 2023). Cette teneur dépend principalement de la variété cultivée, des conditions environnementales, et surtout de la gestion de la fertilisation azotée, qui agit à la fois sur le niveau global de protéines et leur composition qualitative (Arvalis, 2024). Des stress abiotiques, notamment hydriques ou thermiques en fin de cycle, peuvent cependant affecter négativement la synthèse des protéines, réduisant leur concentration et altérant la qualité du gluten (Marti et Slafer, 2014). Ainsi, une stratégie agronomique intégrée, incluant un choix variétal adapté, une fertilisation azotée ciblée et un suivi environnemental, est essentielle pour garantir une teneur optimale en protéines et répondre aux exigences de l'industrie agroalimentaire.

10.3 Poids spécifique : indicateur de densité et de bonne maturation

Le poids spécifique, mesuré en kilogrammes par hectolitre (kg/hl), constitue un paramètre essentiel pour évaluer la densité et la maturité des grains de blé dur. Il sert d'indicateur indirect du bon déroulement du remplissage des grains et de leur richesse en matière sèche, notamment en amidon. Des valeurs élevées (généralement supérieures à 78 kg/hl) sont le signe de grains bien développés, compacts, et moins sujets aux défauts internes, ce qui en fait un critère majeur dans la classification commerciale du blé dur destiné à la semoulerie (Kaya et Akcura, 2014). Un poids spécifique élevé est généralement associé à un

meilleur rendement en semoule et à une transformation industrielle plus performante, car les grains lourds se broient plus régulièrement et libèrent une semoule de qualité supérieure (Wang et Fu, 2020). En revanche, une baisse de ce paramètre peut être le résultat d'un stress climatique, notamment une sécheresse ou une chaleur excessive en fin de cycle, ou encore d'un phénomène de mitadinage ou d'une récolte retardée. De plus, les facteurs variétaux, la fertilisation azotée et la densité de semis influencent également ce critère. Le poids spécifique est ainsi reconnu comme un marqueur simple mais efficace de la qualité globale du grain, à la fois en termes de performances agronomiques et de valorisation technologique à la transformation.

10.4 Taux de mitadinage : impact sur la mouture et la semoulabilité

Le taux de mitadinage correspond à la proportion de grains présentant une texture farineuse ou semi-vitreuse dans un lot de blé dur, caractéristique qui influe directement sur la qualité de la mouture et la capacité à produire une semoule de qualité. Les grains mitadinés, plus fragiles et friables, se brisent plus facilement durant le broyage, ce qui entraîne une diminution du rendement en semoule ainsi qu'une altération de ses propriétés technologiques, notamment la granulométrie et la couleur (Arvalis, 2024). Une forte présence de ces grains indésirables peut également affecter la texture finale des produits dérivés, compromettant la tenue des pâtes après cuisson (Trad et al., 2022). Ce phénomène est souvent amplifié par des conditions climatiques défavorables en phase de maturation, telles que des périodes prolongées d'humidité ou des fluctuations thermiques importantes (Rozbicki et al., 2015). Ainsi, le contrôle du mitadinage s'avère essentiel pour garantir la qualité industrielle des lots de blé dur, en particulier dans les chaînes de transformation où la constance de la matière première est primordiale.

10.5 Proche infrarouge et qualité technologique : vers une analyse efficace et précise du blé dur

La spectroscopie dans le proche infrarouge (NIR) constitue aujourd'hui une méthode de choix pour évaluer rapidement et efficacement la qualité technologique des grains céréaliers (Ibrahim, 2018). Cette technique repose sur la capacité des constituants organiques du grain (tels que les protéines, l'humidité, les lipides et les glucides) à absorber la lumière dans le spectre infrarouge à des longueurs d'onde spécifiques, en fonction des vibrations de certaines liaisons chimiques (C-H, O-H, N-H) (Cassells et al., 2007). Grâce à cette propriété, le NIR permet d'obtenir, sans préparation complexe de l'échantillon, une estimation simultanée de plusieurs paramètres technologiques cruciaux, comme la teneur en protéines, le taux de gluten, la couleur pigmentaire (jaune) ou encore l'humidité du grain. Utilisée notamment dans les

chaînes de sélection variétale ou de transformation industrielle, cette méthode présente l'avantage d'être non destructive, rapide, et adaptée à l'analyse de volumes importants. Par ailleurs, elle permet de mieux suivre la qualité en amont de la transformation, tout en réduisant le recours aux analyses chimiques longues et coûteuses. Dans le cas du blé dur, la spectroscopie NIR s'avère particulièrement pertinente pour le contrôle de critères déterminants dans la production de semoule et de pâtes, où la précision et la rapidité d'analyse sont essentielles.

11. Facteurs influençant la qualité du grain

11.1 Facteurs génétiques

Le potentiel qualitatif d'un grain de blé dur est d'abord défini par sa base génétique. Les caractéristiques variétales influencent fortement la composition protéique, la couleur de l'albumen, ainsi que la proportion de grains vitreux — indicateur important de la qualité en semoulerie (Sissons, 2008). Certaines lignées possèdent des allèles favorables à la synthèse de gluten fort, assurant une bonne aptitude à la transformation en pâte alimentaire (Roncallo *et al.*, 2021). La génétique détermine également la vitesse de remplissage des grains et leur résistance aux stress climatiques, deux facteurs clés pour maintenir une qualité stable, même en conditions fluctuantes (Saleem *et al.*, 2022).

11.2 Facteurs environnementaux

Le climat, la nature du sol et les conditions hydriques pendant les stades critiques du cycle (notamment la montaison, la floraison et le remplissage des grains) exercent une influence majeure sur la qualité du produit final. Un stress hydrique sévère, surtout en période de remplissage, peut entraîner une réduction du poids spécifique, une augmentation du mitadinage et une altération de la teneur en protéines (Li *et al.*, 2013). De plus, des températures excessives pendant la maturation peuvent accélérer le dessèchement des grains au détriment de leur qualité interne, en limitant l'accumulation d'amidon et de protéines structurales (Prathap *et al.*, 2019). Les sols, selon leur capacité de rétention d'eau et leur richesse nutritive, modulent aussi indirectement ces effets en amortissant ou accentuant l'intensité des stress.

12. Moment et méthode de récolte

La phase de récolte joue un rôle souvent sous-estimé dans la préservation de la qualité du grain. Récolter trop tardivement, lorsque l'humidité du grain chute sous les 12–13 %, peut accentuer les pertes mécaniques dues à la fragilité des grains, mais aussi dégrader les caractéristiques technologiques, telles que la vitrosité ou la capacité de mouture (Figueiredo et

al., 2013). Par ailleurs, une moisson réalisée dans de mauvaises conditions (matériel mal réglé, vitesse excessive, humidité variable) peut générer une augmentation des brisures, une contamination par les impuretés ou une baisse du poids spécifique. Ainsi, l'optimisation de la fenêtre de récolte, tenant compte de l'humidité et de la maturité réelle des grains, est essentielle pour garantir à la fois la qualité commerciale et la sécurité de stockage (Mulvaney et Devkota, 2020).

12.1 Pertes de rendement qualitative et quantitative

Effets du retard de récolte sur le rendement et la qualité technologique du blé dur

Le retard de récolte constitue un facteur critique influençant négativement tant le rendement que la qualité technologique des grains de blé dur. L'une des premières conséquences observées est une perte excessive d'humidité au-delà du stade de maturité physiologique, ce qui se traduit par une réduction significative du poids des grains (Xie et *al.*, 2014). En effet, après avoir atteint leur teneur optimale en eau (généralement située entre 14 et 15 %), les grains entament une phase de dessiccation irréversible. Ce phénomène impacte directement le poids spécifique ainsi que la masse volumique, deux paramètres essentiels à la valorisation commerciale et à la transformation industrielle du blé (ISA, 2015).

Le choix de retarder la récolte est souvent motivé par des considérations économiques, notamment la réduction des coûts liés au séchage artificiel des grains. Cette stratégie, répandue à l'échelle mondiale, consiste à laisser le blé sur pied jusqu'à ce que l'humidité atteigne un seuil jugé acceptable pour la récolte mécanique (Parvej et *al.*, 2020). Cependant, cette pratique n'est pas sans risques, car elle expose les grains à des conditions environnementales susceptibles de compromettre leur qualité.

Outre la perte de poids commercialisable, le déficit hydrique prolongé induit par une récolte tardive peut altérer plusieurs propriétés technologiques du grain. La dureté, la capacité de mouture, la couleur de la semoule, ainsi que la stabilité des composés biochimiques tels que les protéines et les pigments caroténoïdes, peuvent être affectées de manière significative (Odjo et *al.*, 2012). Ces altérations peuvent nuire à la qualité de transformation en semoule ou en pâtes alimentaires, ce qui constitue un enjeu majeur pour les industries agroalimentaires.

De plus, selon Dorrian (2023), les grains exposés sur pied à des conditions humides pendant une période prolongée deviennent particulièrement vulnérables à la germination précoce (prégermination). Ce phénomène, également connu sous le nom de "germination sur pied", engendre une dégradation rapide des caractéristiques technologiques, notamment la

ténacité du gluten, essentielle à la bonne tenue de la pâte, ainsi que la coloration de la semoule, qui tend à s'assombrir en cas de prégermination, affectant ainsi la qualité commerciale du produit fini.

En somme, bien que la récolte tardive puisse apparaître comme une solution économique à court terme, elle s'accompagne de multiples risques agronomiques et technologiques qui compromettent à long terme la rentabilité de la culture du blé dur. Une connaissance fine du moment optimal de récolte apparaît ainsi comme un levier fondamental pour maximiser à la fois le rendement et la qualité des grains.

12.2 Pertes causées par la moissonneuse-batteuse

Les pertes mécaniques lors de la récolte mécanique représentent une source significative de réduction du rendement, en particulier lorsque les réglages de la moissonneuse-batteuse ne sont pas adaptés aux conditions du champ ou à la texture du grain. Des études ont montré que ces pertes peuvent varier de 2 % à 18 % du rendement total des céréales, influencées par des facteurs tels que la vitesse d'avancement, la hauteur de coupe et les conditions climatiques (Benaseer et al., 2018). Dans les régions semi-arides, où le blé est souvent récolté sous stress hydrique avancé, la fragilité accrue des épis et la perte d'intégrité des grains amplifient ces pertes (Sintim et al., 2016).

Pour atténuer ces pertes, l'ajustement précis des paramètres techniques de la machine, tels que la vitesse de battage et le débit d'air, ainsi qu'un choix judicieux du moment de récolte, sont essentiels. L'intégration de technologies de mesure des pertes, comme le système "Grain Tablet" de Feiffer Consult, peut également jouer un rôle crucial (Feiffer et al., 2003). Ce dispositif, associé à l'application mobile "Feiffer Grain", permet une évaluation précise des pertes de grains pendant la récolte. Le "Grain Tablet" collecte les pertes de grains, qui sont ensuite quantifiées et analysées via l'application, fournissant des résultats en pourcentage, kg/ha et €/ha. Cette approche facilite l'ajustement optimal de la moissonneuse-batteuse et la calibration des capteurs électroniques de perte, contribuant ainsi à une réduction significative des pertes mécaniques.

Chapitre II

**Comportement agro-
morpho-physiologique
de quelques génotypes
de blé dur sous climat
semi-aride**

Chapitre II

الملخص

تعد تحسين التراكيب الوراثية للقمح الصلب (*Triticum durum Desf.*) بهدف تحقيق تكيف أفضل مع الظروف شبه الجافة تحدياً رئيسياً لإنتاج الحبوب. تهدف هذه الدراسة إلى تقييم السلوك الزراعي-المورفولوجي والفيسيولوجي لثلاثة طرز وراثية من القمح الصلب (بوسلام، وادي البارد، وجيتيا دور) مزروعة في ثلاثة مواقع زراعية إيكولوجية مختلفة بولاية سطيف (المعهد التقني للزراعة الكبرى ITGC ، عين ولمان، وبني فودة) خلال موسمين زراعيين (2020-21 و 2021-2022). تم تنفيذ التجارب وفق تصميم القطاعات العشوائية الكاملة بثلاث مكررات. كشفت نتائج تحليل التباين عن تأثيرات معنوية لكل من التركيب الوراثي والموقع والسننة على عدة مؤشرات، مثل محتوى الكلوروفيل، درجة حرارة العطاء النباتي، استقرار الأغشية، وعدد الأيام إلى خروج السنابل. كما أظهرت تفاعلات التركيب الوراثي × البيئة استجابات متباينة حسب الظروف المناخية. أظهرت نتائج ANOVA أن الموسم الزراعي 2021-2022 كان أكثر ملاءمة، حيث تم تسجيل مردود حبوب أعلى. وتميز الطراز الوراثي بوسلام بأفضل أداء زراعي، يليه وادي البارد. في المقابل، لم يلاحظ أي تأثير معنوي للتركيب الوراثي على مردود الحبوب. وكشفت كل من الانحدار الخطي البسيط، والتحليل إلى المكونات الرئيسية، والتصنيف الهرمي التصاعدي، عن وجود ارتباطات بين مردود الحبوب وعدد السنابل في المتر المربع، وعدد الحبوب في السنبلة، وارتفاع النباتات، والكتلة الحيوية. من جهة أخرى، أظهرت كل من تحليل المسار، والتحليل العاملاني الاستكشافي، والتحليل التدرجي (خطوة بخطوة)، والانحدار الخطي المتعدد، أن وزن ألف حبة ساهم بشكل كبير في التباين في مردود الحبوب. وتبرز هذه الدراسة أهمية اختيار أصناف مبكرة ومتكيفة مع القيود المناخية من أجل تثبيت الإنتاج في المناطق شبه الجافة.

الكلمات المفتاحية : القمح الصلب، شبه الجافة، السلوك الوراثي، التحاليل متعددة المتغيرات.

CHAPITRE II : COMPORTEMENT AGRO-MORPHO-PHYSIOLOGIQUE DE QUELQUES GENOTYPES DE BLE DUR SOUS CLIMAT SEMI-ARIDE.

Résumé

L'amélioration des génotypes de blé dur (*Triticum durum* desf.) pour une meilleure adaptation aux conditions semi-arides constitue un enjeu majeur pour la production céréalière. Cette étude vise à évaluer le comportement agro-morphologique et physiologique de trois génotypes de blé dur (Boussellam, Oued El Bared et GTA dur) semés dans trois sites agroécologiques distincts de la wilaya de Sétif (ITGC, Ain Oulmène et Béni Fouda) au cours de deux campagnes agricoles (2020-2021 et 2021-2022). Les essais ont été conduits selon un dispositif en blocs complètement randomisés avec trois répétitions. L'analyse de la variance a révélé des effets significatifs du génotype, du site et de l'année sur plusieurs paramètres, notamment la teneur en chlorophylle, la température du couvert végétal, la stabilité membranaire et le nombre de jours à l'épiaison. L'interaction génotype x environnement souligne des réponses différencierées selon les conditions climatiques. Les résultats de l'ANOVA montrent que la campagne 2021-2022 a été plus favorable, avec des rendements en grains plus élevés. Le génotype Boussellam s'est distingué par les meilleures performances agronomiques, suivi de Oued El Bared. En revanche, aucun effet significatif du génotype n'a été observé sur le rendement en grains. La régression linéaire simple, l'analyse en composantes principales et la classification hiérarchique ascendante révèlent des corrélations entre le rendement en grains avec le nombre d'épis par mètre carré, le nombre de grains par épis, la hauteur des plantes et la biomasse. Par ailleurs, l'analyse de chemin, l'analyse factorielle exploratoire, l'analyse par étape (pas à pas) et la régression linéaire multiple ont montré que le poids de mille grains contribuait significativement aux variations du rendement en grains. Cette étude met en avant l'importance de la sélection de variétés précoces et adaptées aux contraintes climatiques pour stabiliser la production en zones semi-arides.

Mots clés : Blé dur, semi-aride, comportement génotypique, analyses multivariées.

CHAPITRE II : COMPORTEMENT AGRO-MORPHO-PHYSIOLOGIQUE DE QUELQUES GENOTYPES DE BLE DUR SOUS CLIMAT SEMI-ARIDE.

Abstract

Improving the genetic makeup of durum wheat (*Triticum durum Desf.*) to achieve better adaptation to semi-arid conditions is a major challenge for grain production. This study aims to evaluate the agro-morphological and physiological behavior of three durum wheat genotypes (Boussellam, Oued El Bared and GTA Dur) grown in three different agro-ecological sites in the Sétif region (ITGC, Ain Oulmene, and Béni Fouda) over two cropping seasons (2020-21 and 2021-22). The trials were conducted using a randomized complete block design with three replications. Analysis of variance revealed significant effects of genotype, site, and year on several traits, including chlorophyll content, canopy temperature, membrane stability, and days to heading. Genotype x environment interactions showed variable responses depending on climatic conditions. ANOVA results indicated that the 2021-22 cropping season was more favorable, with higher grain yields recorded. The Boussellam genotype showed the best agronomic performance, followed by Oued El Bared. However, no significant genotype effect was observed on final grain yield. Simple linear regression, principal component analysis and hierarchical clustering revealed correlations between grain yield and traits such as number of spikes per square meter, number of grains per spike, plant height, and biomass. Additionally, path analysis, exploratory factor analysis, stepwise regression, and multiple linear regression demonstrated that thousand-kernel weight contributed significantly to grain yield variation. This study highlights the importance of selecting early-maturing and climate-adapted varieties to stabilize wheat production in semi-arid regions.

Keywords: Durum wheat, semi-arid, genetic behavior, multivariate analysis.

CHAPITRE II : COMPORTEMENT AGRO-MORPHO-PHYSIOLOGIQUE DE QUELQUES GENOTYPES DE BLE DUR SOUS CLIMAT SEMI-ARIDE.

INTRODUCTION

Le blé dur (*Triticum durum* Desf.) est une céréale de base essentielle à l'échelle mondiale, notamment en Méditerranée, en Afrique du Nord et au Moyen-Orient. Il joue un rôle essentiel dans la production alimentaire et les revenus agricoles (Martínez-Moreno et al., 2022, Tedone et al., 2018). Originaire de l'est de la Méditerranée, où il est cultivé depuis 12 000 ans, il est considéré comme l'un des plus anciens cultivars de blé d'hiver au monde (Constantinidou et al., 2016). En Algérie, la culture des céréales occupe une superficie annuelle estimée entre 3 et 3,5 millions d'hectares, correspondant à 40 % de la surface agricole utile (SAU) du pays (MADR, 2021). Parmi ces cultures, le blé dur constitue la principale espèce cultivée, représentant 54 % de la superficie céréalière totale (Henni, M., 2022). En Algérie, bien que diverses variétés de blé dur soient cultivées, qu'il s'agisse de variétés locales, mieux adaptées aux conditions climatiques spécifiques, ou de variétés introduites et sélectionnées caractérisées par leur haut potentiel de rendement en conditions optimales, la productivité reste modérée à faible, en particulier dans les hauts plateaux. De plus, la production nationale de blé dur couvre que 24 à 55 % de la consommation annuelle (ITGC, 2022 ; Djoudi et al., 2024), tandis que les besoins du pays sont estimés à 8,5 millions de tonnes par an (Hannachi et Fellahi., 2023). Cette limitation est principalement attribuable à plusieurs facteurs agro-climatiques, où les précipitations et les températures sont soumises à de fortes variations intra- et interannuelles, souvent associées à de fréquentes gelées printanières surtout aux hauts plateaux et à l'apparition de sirocco au stade de remplissage des grains ; qui affectent sérieusement les rendements (Benniou et al. 2018 ; Guendouz et al., 2021). Ainsi Othmani et al. (2021) ont affirmé que la salinité et la sécheresse sont deux stress environnementaux courants qui affectent la germination des graines et la croissance des plantes, en particulier dans les régions arides et semi-arides. Selon Gilani et al. (2020), le stress dû à la sécheresse diminue la production des cultures tandis que le manque d'eau réduit la croissance et la productivité des plantes. Pour faire face à ces contraintes et survivre, les plantes ont développé différents mécanismes d'adaptation en modifiant leurs systèmes métaboliques (Labgaa Nadjat 2018). Actuellement, outre la productivité, qui a été l'objectif principal de la plupart des améliorations du blé dur (Saidi 2018), les programmes de sélection se concentrent sur l'amélioration génétique de la tolérance aux stress abiotiques (sécheresse, salinité, froid, chaleur, etc.) à travers l'identification de paramètres morpho-physiologiques et biochimiques (Ghanem 2017). Plusieurs critères physiologiques, morphologiques et biochimiques ont ainsi été identifiés. L'accumulation de proline et de sucres solubles, la croissance végétative et l'efficacité photosynthétique ont été

CHAPITRE II : COMPORTEMENT AGRO-MORPHO-PHYSIOLOGIQUE DE QUELQUES GENOTYPES DE BLE DUR SOUS CLIMAT SEMI-ARIDE.

considérées comme des critères de tolérance (Chaouachi et al., 2023). Plusieurs études ont mis en évidence l'importance de la précocité de l'épiaison et de la maturité comme des critères essentiels pour la sélection des variétés de blé adaptées aux conditions climatiques contraignantes (Boudersa et al., 2021 ; Mansouri et al., (2018). Bakha et al. (2019) ; Chaouachi et al. (2024) ont démontré que les conditions de sécheresse accélèrent la dégradation de la chlorophylle, réduisant ainsi la surface foliaire, teneur relative en eau et la photosynthèse. Par conséquent, les génotypes qui restent verts plus longtemps grâce à une sénescence retardée peuvent améliorer leurs performances en conditions de sécheresse. En effet, une réduction de l'hydratation du blé dur entraîne une diminution de la biomasse (Benziouche Achouak, 2021), réduction de la surface foliaire et sa teneur en eau (Suliman et al., 2024), une fermeture stomatique et une réduction de la viabilité cellulaire (Patil and Ram, 2024). L'état hydrique de la plante dépend fortement de la stabilité thermique. Une élévation excessive de la température provoque la déshydratation des tissus végétaux, limitant ainsi la croissance et le développement des plantes (Benhamed et Benamara, 2020). Plusieurs études ont montré que les génotypes de blé présentant une perte d'eau foliaire réduite sont considérés comme plus tolérants à la sécheresse (Lamaoui et al., 2018). Selon Guendouz et al. (2016), le stress hydrique modifie la morphologie des feuilles, impacte leur croissance et entraîne une adaptation physiologique visant à optimiser l'utilisation des ressources disponibles. Divers traits agro-morphologiques et physiologiques, tels que la hauteur de la plante, le nombre de tiges fertiles par plante, la longueur de l'épi, le nombre de grains par épis, le poids de mille grains et la stabilité membranaire, influencent non seulement la tolérance du blé au stress hydrique, mais ils constituent également des indicateurs clés des stratégies morphologiques adoptées par les génotypes adaptatifs pour faire face à la sécheresse (Etminan et al., 2019 ; Liaqat et al., 2024; Qaseem et al., 2019). Le stress hydrique entraîne une réduction significative de la durée du remplissage des grains (~14 %), ce qui limite le transfert des réserves vers les grains et réduit leur taille ainsi que leur poids final, affectant directement le rendement. Cette contrainte physiologique s'accompagne d'une augmentation de la température du couvert végétal (~21 %), due à une diminution de la transpiration causée par la fermeture des stades (Pour-Aboughadareh et al., 2020). Sur le plan agronomique, des traits tels que le rendement en grain, le poids de mille grains, le nombre d'épis par plante et l'indice de récolte sont couramment utilisés pour évaluer l'adaptation des variétés aux conditions limitantes (Hill et al., 2024). En outre, la capacité de certaines variétés à maintenir une activité photosynthétique efficace en période de sécheresse constitue un avantage adaptatif significatif (Qiao et al., 2024). Dans ce contexte, l'amélioration génétique des plantes joue un rôle fondamental dans la création de

CHAPITRE II : COMPORTEMENT AGRO-MORPHO-PHYSIOLOGIQUE DE QUELQUES GENOTYPES DE BLE DUR SOUS CLIMAT SEMI-ARIDE.

nouveaux génotypes, en se basant sur les caractères contribuants directement ou indirectement à l'adaptation au milieu. Il est également essentiel d'identifier les sources de variations phéno-morpho-physiologiques favorisant l'acclimatation aux conditions climatiques contraignantes. Ainsi, il devient impératif de rechercher la meilleure adaptation à la variabilité environnementale afin de stabiliser les rendements dans ces régions et d'adopter un itinéraire technique optimisé pour une valorisation plus efficace des précipitations saisonnières. Face aux défis posés par les conditions semi-arides, cette étude vise à évaluer le comportement agro-morphologique et physiologique de différents génotypes de blé dur dans trois zones agroécologiques distinctes. L'objectif est d'identifier les génotypes présentant les meilleures performances afin d'orienter les programmes d'amélioration variétale et d'optimiser les pratiques culturales, contribuant ainsi à une production durable du blé dur dans les régions à climat aride et semi-aride.

CHAPITRE II : COMPORTEMENT AGRO-MORPHO-PHYSIOLOGIQUE DE QUELQUES GENOTYPES DE BLE DUR SOUS CLIMAT SEMI-ARIDE.

MATERIELS ET METHODES

1. Site expérimental

L’expérimentation a été réalisé durant deux campagnes agricole 2020- 2021 et 2021-22, dans trois zones agroécologiquement différentes appartenant à l’étage bioclimatique semi-aride et représentant les régions : Centre, Sud et Nord Est de la wilaya de Sétif (Figure 7). Les zones se caractérisent par deux grandes saisons très marquées, un hiver froid et humide et un été chaud et sec. Le manque d’eau s’installe à partir du mois d’avril (Mekhlouf, et al., 2001) et la sécheresse s’établit durant 5 mois, de mai à septembre (Chennafi, 2007).

Le site expérimental du centre de Sétif à la ferme semencière de l’ITGC, située à 6 km de la ville de Sétif, en ligne droite au Sud-Ouest de la ville Sétif (ITGC- 36° 08'22"N. 5°20'55"E, 973 m amsl, Algérie). Le sol de ce site présente une texture limono-argileuse et une teneur moyenne en matière organique d’environ 2,8 % (Bendada, 2021). Il possède une humidité pondérale de 7,65 %, une densité apparente de 1,35 g.cm⁻³, une capacité au champ de 25 % (Semcheddine, 2015) et une porosité de 56,65 %.

Celui de Ain Oulmène est situé environ 34 km au sud de la wilaya de Sétif (35° 55'30"N. 5° 22'07"E, 934 m amsl, Algérie), Ce site est caractérisé par des sols essentiellement calcaires, généralement peu épais en surface, à faible fertilité, sensibles à l’érosion et pauvres en matière organique. Ces sols sont également basiques, avec un pH de 8,38 (Chermat, 2013). La densité apparente est de 1,20 g.cm⁻³, l’humidité pondérale du sol atteint 6,01 %, et la porosité est de 54,72 %.

Enfin, le site expérimental de Béni Fouda a été mis à notre disposition par l’Exploitation Agricole Collective "Dahal Nouari", située à Chirhoum, dans la commune de Béni Fouda. Ce site se trouve à 12 km au nord-est du chef-lieu de la wilaya de Sétif (36°15'08"N, 5°29'43"E, 1199 m amsl). Le sol du site est caractérisé par une texture limono-argileuse, avec une densité apparente de 1,40 g.cm⁻³. Il présente un point de saturation de 45 % et une capacité au champ de 27 % (Semcheddine, 2015). L’humidité pondérale du sol est de 7,77 %, tandis que sa porosité atteint 57,43 %.

CHAPITRE II : COMPORTEMENT AGRO-MORPHO-PHYSIOLOGIQUE DE QUELQUES GENOTYPES DE BLE DUR SOUS CLIMAT SEMI-ARIDE.



Figure 7: Localisation des sites expérimentaux durant les deux compagnes.

2. Matériel végétal et conduite culturale

Le matériel végétal utilisé se compose de trois génotypes de blé dur : Boussellam, Oued El Bared et GTA dur. Les semis ont été réalisés selon un dispositif en blocs complètement randomisés avec trois répétitions. Chaque parcelle, d'une dimension de 2,5 mètres de longueur et 1,2 mètre de largeur, comporte six rangs espacés de 0,2 mètre entre les lignes. La densité de semis est estimée à 300 grains.m⁻². Les parcelles expérimentales de l'ITGC ont été fertilisées avec 100 kg.h⁻¹ de phosphate mono-ammonique (12 % N + 52 % P₂O₅) avant le semis, puis avec 80 kg.h⁻¹ d'urée (46 % N) au stade début tallage. Les parcelles expérimentales de Ain Oulmène et Beni Fouda ont été fertilisé avec 200 kg.h⁻¹ de Phosphate Mono-ammonique (MAP 12.61.00) au semis, puis avec 150 kg.h⁻¹ de Sulfazote (N=26%, S=35%) au stade début tallage. Le désherbage a été réalisé dans les trois sites au stade post-levée avec désherbant sélectif de blé dur antigraminées dès que les adventices atteignent 2-4 feuilles avec *Topik* (*clodinafop-propargyl* 80 g.l⁻¹), puis au stade fin tallage avec désherbant *Zoom* (65 % de *dicamba* + 4,1 % de *triasulfuron*) est un herbicide sélectif utilisé principalement en grandes cultures pour lutter contre les adventices dicotylédones.

CHAPITRE II : COMPORTEMENT AGRO-MORPHO-PHYSIOLOGIQUE DE QUELQUES GENOTYPES DE BLE DUR SOUS CLIMAT SEMI-ARIDE.

Tableau 1: Le pedigree et l'origine des génotypes testés (ITGC, 2025).

	Paramètre	Caractéristiques
<i>Rousselam</i>	Origine	Syrie
	Pedigree	Heider/Martes/Huevos de Oro. ICD-414
	Obtenteur	Semillas Fito S.A.
	Demandeur	ITGC
	Année d'inscription	2007
	Plante – Hauteur	Moyenne
	Épiaison (50 % des plantes)	Précoce
	Rendement	Élevé
	Poids de mille grains (PMG)	Élevé
	Qualité semoulière	Bonne
	Mitadinage	Résistant
	Teneur en protéines	15,01%
	Oïdium sur feuille	Moyennement sensible
	Rouille brune	Faible
	Rouille jaune	Sensible
	Fusariose	Moyennement sensible
<i>Oued El Bared</i>	Paramètre	Caractéristiques
	Origine	ITGC-Sétif
	Année d'inscription	2016
	Pedigree	Gta dur/Ofanto
	Zone d'adaptation	Hauts Plateaux, Plaines intérieures Est
	Paille (section transversale)	Peu épaisse
	Alternativité	Hiver
	Cycle végétatif	Précoce
	Tallage	Fort
	Tolérance au froid	Tolérante
	Tolérance à la sécheresse	Haute tolérance
	Tolérance à l'égrenage	Haute tolérance
<i>GTA dur</i>	Paramètre	Caractéristiques
	Origine	Mexique
	Pedigree	*Crane/4/PolonicumPI185309// T.glutin en/2* Tc60/3/Gll
	Demandeur	ITGC
	Année d'inscription	1998
	Épiaison (50 % des plantes)	Précoce
	Type de développement	Hiver
	Rendement	Élevé
	Poids de mille grains	Élevé
	Qualité semoulière	Élevée
	Oïdium sur feuille	Résistante
	Oïdium sur tige	Résistante
	Rouille brune	Résistante
	Charbon	Résistante
	Septoriose	Résistante

CHAPITRE II : COMPORTEMENT AGRO-MORPHO-PHYSIOLOGIQUE DE QUELQUES GENOTYPES DE BLE DUR SOUS CLIMAT SEMI-ARIDE.

3. Caractères mesurés et notations réalisées

3.1 Paramètres physiologiques

3.1.1 Teneur en chlorophylle (CHL spad)

La teneur en chlorophylle, indicateur clé de l'état physiologique des plantes et de leur capacité photosynthétique, peut être estimée de manière non destructive avec un chlorophyllomètre SPAD 502 plus (Figure 7). Cet appareil mesure l'absorbance des feuilles à 660 nm (rouge) et 940 nm (infrarouge proche), permettant d'évaluer la teneur en chlorophylle, la nutrition azotée et la réponse aux stress abiotiques (Nampila et al., 2016). Méthode rapide et fiable. La valeur obtenue représente la moyenne de cinq mesures prises le long de la zone médiane de la feuille étandard pour surveiller l'état nutritionnel des plantes et optimiser la fertilisation.



Figure 8: Évaluation de la teneur en chlorophylle à l'aide du SPAD

3.1.2 La teneur relative en eau (TRE %)

La teneur relative en eau est un indicateur clé de l'état hydrique des plantes. Sa mesure a été effectuée au stade épiaison sur un échantillon de cinq feuilles, selon la méthode de Pask et al. (2013), reprise par Fellahi et al. (2024). Les feuilles collectées sont coupées à la base du limbe et immédiatement pesées pour déterminer leur poids frais (PF, mg). Elles sont ensuite placées dans un tube à essai contenant 10 mL d'eau distillée, puis conservées à 4°C dans l'obscurité pendant 24 heures. Après cette période, elles sont soigneusement essuyées avec du papier buvard avant d'être pesées à nouveau afin d'obtenir leur poids turgide (PT, mg). Enfin, les échantillons sont séchés dans une étuve à 80°C pendant 24 heures pour déterminer leur poids sec (PS, mg). Cette approche permet d'évaluer la capacité des feuilles à retenir l'eau et ainsi

CHAPITRE II : COMPORTEMENT AGRO-MORPHO-PHYSIOLOGIQUE DE QUELQUES GENOTYPES DE BLE DUR SOUS CLIMAT SEMI-ARIDE.

d'analyser l'impact des conditions environnementales sur l'hydratation des plantes. La teneur relative en eau (TRE) est déterminée à l'aide de la formule suivante :

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

3.1.3 La vitesse de perte d'eau (LWL)

La vitesse de perte d'eau (LWL, $\text{mg.cm}^{-2}.\text{mn}^{-1}$) a été évaluée afin de quantifier la capacité des feuilles à conserver leur hydratation après prélèvement. Pour ce faire, cinq feuilles ont été coupées au hasard dans chaque parcelle et immédiatement pesées afin de déterminer leur poids frais initial (PF1), puis exposées à un rayonnement solaire direct, sous un ensoleillement maximal (midi solaire), pendant une durée de 30 minutes. À l'issue de cette période, elles ont été pesées une seconde fois pour obtenir leur poids frais après dessiccation (PF2). Cette approche permet d'estimer la vitesse de perte en eau et d'analyser la résistance des feuilles à la déshydratation, un paramètre essentiel dans l'évaluation de la tolérance au stress hydrique. La vitesse de perte d'eau (LWL) est calculée à l'aide de la formule suivante, citée par Nazir *et al.* (2021) :

$$\text{LWL } (\text{mg.cm}^{-2}.\text{min}^{-1}) = (\text{PF1} - \text{PF2}) / (30 \times \text{SF})$$

3.1.4 Fuite des électrolytes (FE %)

La fuite des électrolytes est un indicateur clé de la stabilité membranaire et de la tolérance des plantes aux stress abiotiques. Une membrane cellulaire intacte maintient l'équilibre ionique, tandis que les stress environnementaux (sécheresse, chaleur, salinité) augmentent sa perméabilité, entraînant une libération accrue des ions intracellulaires. Pour évaluer ce phénomène, dix segments de feuilles fraîches (1 cm de diamètre) ont été prélevés, lavés trois fois avec de l'eau déionisée, puis incubés dans 10 mL d'eau déionisée à température ambiante pendant 24 h. La conductivité électrique initiale (EC1) a ensuite été mesurée avant un traitement thermique dans un bain-marie à 100°C pendant 60 min pour libérer l'ensemble des électrolytes. Après refroidissement à 25°C, la conductivité finale (EC2) a été déterminée afin de quantifier la fuite des électrolytes (Hniličková *et al.*, 2019).

La fuite des électrolytes (EL) a été calculée selon la formule suivante :

$$\text{EL} = (\text{EC1}/\text{EC2}) \times 100 (\%)$$

L'indice de stabilité membranaire (MSI) a été calculé en utilisant l'équation de Sairam *et al.* (2002).

CHAPITRE II : COMPORTEMENT AGRO-MORPHO-PHYSIOLOGIQUE DE QUELQUES GENOTYPES DE BLE DUR SOUS CLIMAT SEMI-ARIDE.

$$\text{MSI} = [1 - \left(\frac{\text{EC1}}{\text{EC2}} \right)] \times 100$$

3.1.5 Température du couvert végétal (TC °C)

La température de la canopée (TC) est un indicateur clé de l'état hydrique et de la tolérance au stress des plantes. En conditions de sécheresse, la réduction de la transpiration entraîne une augmentation de la température (Rebetzke *et al.*, 2013). Les mesures ont été réalisées par thermomètre infrarouge Tecpel 513, positionné à 1 m au-dessus du couvert végétal et incliné à 30°. Cette méthode permet une évaluation fiable du statut thermique des plantes et de leur adaptation aux stress abiotiques.

3.2 Paramètres phéno-morphologiques

3.2.1 Nombre de jours à l'épiaison (NJE)

La durée jusqu'à l'épiaison est définie comme le nombre de jours écoulés entre le semis et la date à laquelle 50 % des plantes atteignent l'épiaison. Cet indicateur clé permet d'évaluer la précocité ou la tardivité des génotypes en fonction des conditions agro-climatiques.

3.2.2 Surface de la feuille ´tandard (SF cm)

La longueur et la largeur maximale de la feuille ´tandard ont été mesur  es sur un échantillon de cinq feuilles du brin maître, s  lectionn  es aléatoirement au stade ´piaison. La surface moyenne de la dernière feuille entièrement d  velopp  e a ensuite été estim  e selon la méthode de Spagnoletti-Zeuli et Qualset (1990) :

$$\text{SF (cm}^2\text{)} = 0,606 (\text{L} \times \text{l})$$

Où : L : longueur moyenne de la feuille ´tandard (cm)

l : largeur moyenne de la feuille ´tandard (cm)

0,606 : est le coefficient de régression de la surface estim  e travers une feuille millim  tr  e.

3.2.3 Poids Spécifique Foliaire (PSF mg.cm⁻²)

Le poids spécifique foliaire du blé est un indicateur morpho-physiologique qui correspond au rapport entre la masse sèche d'une feuille et sa surface. Il permet d'évaluer l'épaisseur et la densité des feuilles. Cinq feuilles ´tandard ont été pr  lev  es sur chaque cultivar, puis leur surface foliaire moyenne (SF) a été mesur  e. Elles ont ensuite été s  ch  es  80°C pendant 24 heures afin de déterminer leur poids sec moyen (PS).

CHAPITRE II : COMPORTEMENT AGRO-MORPHO-PHYSIOLOGIQUE DE QUELQUES GENOTYPES DE BLE DUR SOUS CLIMAT SEMI-ARIDE.

Selon Fellah (2008), le poids spécifique foliaire est calculé à l'aide de la formule suivante :

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

3.2.4 Hauteur de la plante (HP cm)

La hauteur de la plante est la distance entre la base de la tige (collet) et l'extrémité des barbes, généralement exprimée en cm. Elle dépend du génotype, des conditions environnementales, de la fertilisation et de la densité de semis. Ce paramètre influence la résistance à la verse, l'efficacité de la photosynthèse et le rendement en grain, ce qui en fait un critère important en sélection variétale et en gestion culturelle.

3.3 Les paramètres agronomiques

3.3.1 Rendement en grains (RDT q.h⁻¹)

La détermination du rendement en grains se fait par échantillonnage sur une surface d'un mètre carré pour chaque génotype. Les échantillons sont ensuite battus mécaniquement, pesés, puis convertis en quintaux par hectare.

3.3.2 Biomasse aérienne (Bio q.h⁻¹)

La biomasse aérienne est estimée à partir de la récolte d'un échantillon de végétation prélevé sur un segment de rang d'un 1m². Le poids de l'échantillon est ensuite converti en quintaux par hectare.

3.3.3 Indice de la récolte (IR %)

L'indice de récolte est un indicateur agronomique qui exprime l'efficacité d'une plante à convertir sa biomasse totale en rendement grainier. Il est défini comme le rapport entre le rendement en grains et la biomasse aérienne totale mesurée à maturité. Il est généralement exprimé sous forme de pourcentage :

$$\text{IR (\%)} = [\text{RDT (q.h}^{-1}\text{)} / \text{BIO (q.h}^{-1}\text{)}] \times 100$$

3.3.4 Poids de mille grains (PMG g)

Poids de mille grains est déterminé en comptant et pesant un échantillon de 250 grains par parcelle élémentaire, puis extrapolé en grammes pour 1 000 grains.

CHAPITRE II : COMPORTEMENT AGRO-MORPHO-PHYSIOLOGIQUE DE QUELQUES GENOTYPES DE BLE DUR SOUS CLIMAT SEMI-ARIDE.

3.3.5 Nombre de grains par épi (NGE^{-1})

Le nombre de grains par épi est déterminé en comptant les grains de cinq épis sélectionnés, puis en calculant la moyenne en divisant la somme totale des grains par le nombre d'épis.

3.3.6 Nombre d'épis par mètre carré (NEm^{-2})

Le nombre d'épis par mètre carré est estimé en comptant les épis sur une surface de 0,25 m^2 , puis en extrapolant cette valeur pour un mètre carré.

4. Analyse statistique

Pour évaluer les différences significatives entre les génotypes, une analyse de variance à trois facteurs (ANOVA) a été réalisée. Le test LSD de Fisher a été utilisé pour comparer les moyennes. L'analyse de corrélation de Pearson et la régression linéaire simple ont été appliquées afin de déterminer la relation statistique entre les variables et d'évaluer la signification des effets à l'aide des logiciels CoStat version 6.4. Les autres analyses ont été effectuées avec RStudio Team, utilisant R version 4.5.0.

4.1 Analyse de la variance (ANOVA)

L'analyse de la variance (ANOVA) est une méthode statistique permettant de comparer les moyennes de plusieurs groupes. Afin de déterminer s'il existe des différences significatives entre eux.

4.2 Corrélation linéaire simple

La corrélation linéaire simple mesure l'intensité et la direction de la relation entre deux variables quantitatives. Elle est évaluée à l'aide du coefficient de corrélation de Pearson, qui varie entre -1 et 1 (Pearson, 1985).

$$r(x, y) = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{(\sum x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{(\sum y_i - \bar{y})^2}}$$

Où : X_i et Y_i sont les valeurs individuelles des variables X et Y,

\bar{x} et \bar{y} sont les moyennes de X et Y

\sum représente la somme sur toutes les observations.

CHAPITRE II : COMPORTEMENT AGRO-MORPHO-PHYSIOLOGIQUE DE QUELQUES GENOTYPES DE BLE DUR SOUS CLIMAT SEMI-ARIDE.

4.3 Régression linéaire multiple

Une régression linéaire multiple est une méthode statistique qui modélise la relation entre une variable dépendante et plusieurs variables indépendantes à l'aide d'une équation linéaire. Elle permet d'expliquer et de prédire la valeur de la variable cible en fonction de plusieurs facteurs explicatifs (Draper. 1998).

L'équation générale de la régression linéaire multiple est :

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon$$

Où : Y est la variable dépendante,

X₁, X₂, ..., X_n sont les variables indépendantes,

β_0 est l'ordonnée à l'origine (intercept),

$\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ sont les coefficients de régression,

ε est l'erreur aléatoire.

4.4 Régression multiple linéaire pas à pas (Stepwise régressions)

La régression linéaire multiple pas à pas sélectionne les variables explicatives les plus pertinentes en les ajoutant ou en les supprimant selon des critères statistiques (ex : valeur-p ou AIC). Elle peut être ascendante, descendante ou mixte. Cette méthode optimise le modèle en réduisant les variables inutiles (Montgomery et al., 2021).

4.5 Analyse du chemin (Path Analysis)

L'analyse du chemin, selon Dewey et Lu (1959), est une méthode statistique permettant de décomposer la corrélation entre une variable dépendante et plusieurs variables indépendantes en effets directs et indirects. Elle aide à mieux comprendre les relations causales en utilisant des coefficients de chemin :

$$r_{ij} = P_{ij} + \sum_k r_{ik}P_{kj}$$

Où : r_{ij} : coefficient de corrélation totale entre la variable indépendante i et la variable dépendante j . P_{ij} : effet direct de la variable i sur j (coefficient de chemin). $\sum r_{ik}P_{kj}$: effet indirect, passant par d'autres variables intermédiaires k .

CHAPITRE II : COMPORTEMENT AGRO-MORPHO-PHYSIOLOGIQUE DE QUELQUES GENOTYPES DE BLE DUR SOUS CLIMAT SEMI-ARIDE.

4.6 Analyse en composantes principales (ACP)

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) est une méthode statistique qui réduit la dimension des données en transformant des variables corrélées en nouvelles variables indépendantes. Elle permet de mieux visualiser et interpréter les relations entre individus et variables. L'ACP est couramment utilisée en exploration de données et en modélisation (Jolliffe, 2002).

4.7 Classification Hiérarchique Ascendante (CAH)

La Classification Hiérarchique Ascendante est une méthode de classification qui regroupe progressivement des individus en classes selon leur similarité. Elle commence par considérer chaque individu comme une classe distincte, puis fusionne les classes les plus proches jusqu'à obtenir une hiérarchie de regroupements sous forme de dendrogramme (Lebart et al., 1995)

RÉSULTATS ET DISCUSSION

1. Analyse des données climatiques

1.1 Température :

L'évolution des températures moyennes mensuelles enregistrées sur les sites d'ITGC, Ain Oulmène et Beni Fouda au cours des campagnes agricoles 2020-21 et 2021-22 (Figure 8) a présenté une variation saisonnière marquée du climat de la région. En automne, les températures commencent à diminuer, coïncidant avec la période de préparation des semis. Durant l'hiver, elles atteignent leurs niveaux les plus bas, notamment entre décembre, janvier et février, ce qui peut ralentir la croissance végétative du blé dur. À partir d'avril, une remontée progressive est observée, atteignant un pic en juin. Cette dynamique est caractéristique des climats méditerranéens et semi-arides, où l'hiver est froid et l'été chaud, influençant ainsi le développement et le cycle phénologique de la culture.

Les courbes des deux campagnes suivent une tendance similaire, témoignant d'une stabilité climatique relative entre les deux saisons. Cependant, on note des écarts ponctuels, notamment une légère hausse des températures en 2021-22 par rapport à 2020-21, en particulier en septembre et en fin de campagne.

Ain Oulmène enregistre des températures plus élevées, notamment en septembre et en juin, par rapport à l'ITGC, suivi de Beni Fouda. Ces écarts de température entre les trois sites

CHAPITRE II : COMPORTEMENT AGRO-MORPHO-PHYSIOLOGIQUE DE QUELQUES GENOTYPES DE BLE DUR SOUS CLIMAT SEMI-ARIDE.

peuvent être attribués à des conditions microclimatiques spécifiques, telles que l'altitude, la proximité de masses d'eau et les caractéristiques du sol influençant la rétention et la dissipation thermique.

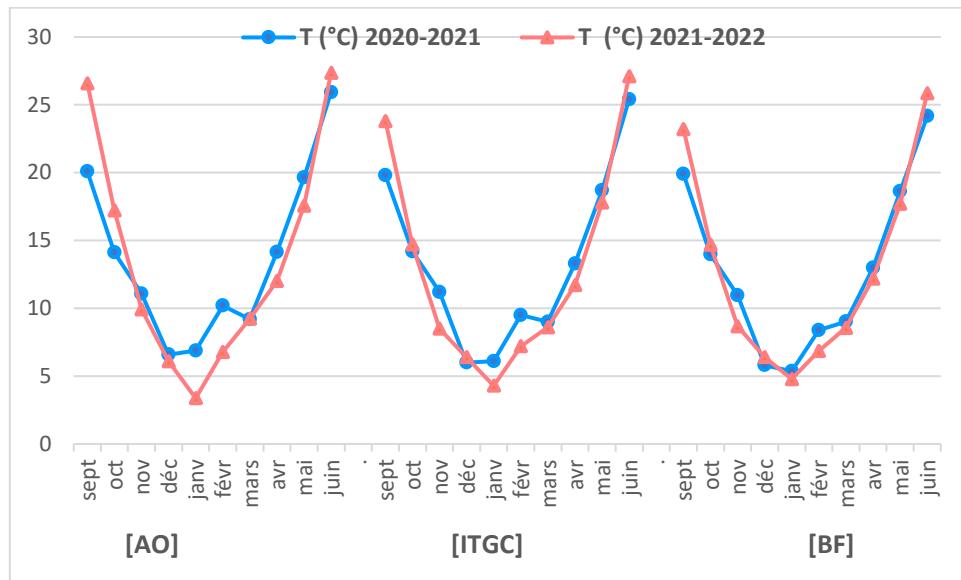


Figure 9: Températures moyennes mensuelles des deux campagnes agricoles (2020-21 et 2021-22) sur les trois sites d'étude.

1.2 Pluviométrie

Les cumuls pluviométriques enregistrés durant les deux saisons de culture 2020-21 et 2021-22 au cours des mois de septembre à juin (Tutiempo, 2025) étaient respectivement de 292,6 et 192,2 mm à Ain Oulmène (ONM,2023) (Figure 9), 300,46 et 330,46 à l'ITGC (Tutiempo, 2025), et 490,94 et 486,29 mm à Beni Fouda (NASA, 2025).

En 2020-21, en automne, les sites d'Ain Oulmène et de l'ITGC ont enregistré les précipitations les plus faibles en octobre, avec respectivement 4,6 mm et 7,12 mm, ce qui a pu limiter l'installation des semis. En revanche, le mois de novembre a marqué une amélioration significative des apports hydriques sur les trois sites, avec des cumuls variant entre 35 mm et 74,5 mm, favorisant ainsi la levée des grains et contribuant à un bon stockage de l'eau dans le sol.

En hiver, les précipitations sont restées relativement faibles à Ain Oulmène et à l'ITGC, en particulier en janvier et février, où les cumuls mensuels ont été insuffisants pour couvrir les besoins hydriques du blé dur. Ce déficit hydrique a pu ralentir la croissance végétative et affecter le tallage, une phase clé du développement de la culture.

CHAPITRE II : COMPORTEMENT AGRO-MORPHO-PHYSIOLOGIQUE DE QUELQUES GENOTYPES DE BLE DUR SOUS CLIMAT SEMI-ARIDE.

Au printemps, les précipitations sont devenues plus irrégulières, notamment en avril où le site ITGC a enregistré un minimum de 9 mm, exposant davantage la culture à un stress hydrique. En mai, les précipitations ont nettement augmenté et ont atteint leur maximum sur l'ensemble des sites, avec 104 mm à Beni Fouda, 84,6 mm à Ain Oulmène et 81,5 mm à l'ITGC. Toutefois, ces pluies tardives peuvent être très bénéfiques, surtout si elles coïncident avec la période de remplissage des grains.

Ainsi, la saison 2020-21 s'est caractérisée par une répartition inter-mensuelle irrégulière et peu équilibrée des précipitations, avec des apports limités en hiver et un rapport hydrique important en fin de cycle, en particulier à Ain Oulmène et à l'ITGC, rendant cette campagne moins favorable à un bon rendement du blé dur.

En 2021-22, Ain Oulmène a connu une baisse significative des précipitations en début de saison par rapport à l'année précédente, avec un recul de 59,17 % entre septembre et janvier (Figure 9). Cette diminution a créé des conditions très défavorables pour la culture, pouvant affecter la densité de levée.

L'ITGC a enregistré les précipitations les plus importantes en septembre (41,42 mm), novembre (84,6 mm), mars (46,98 mm) et avril (82,29 mm). En revanche, octobre, mai et juin sont les mois les moins pluvieux.

CHAPITRE II : COMPORTEMENT AGRO-MORPHO-PHYSIOLOGIQUE DE QUELQUES GENOTYPES DE BLE DUR SOUS CLIMAT SEMI-ARIDE.

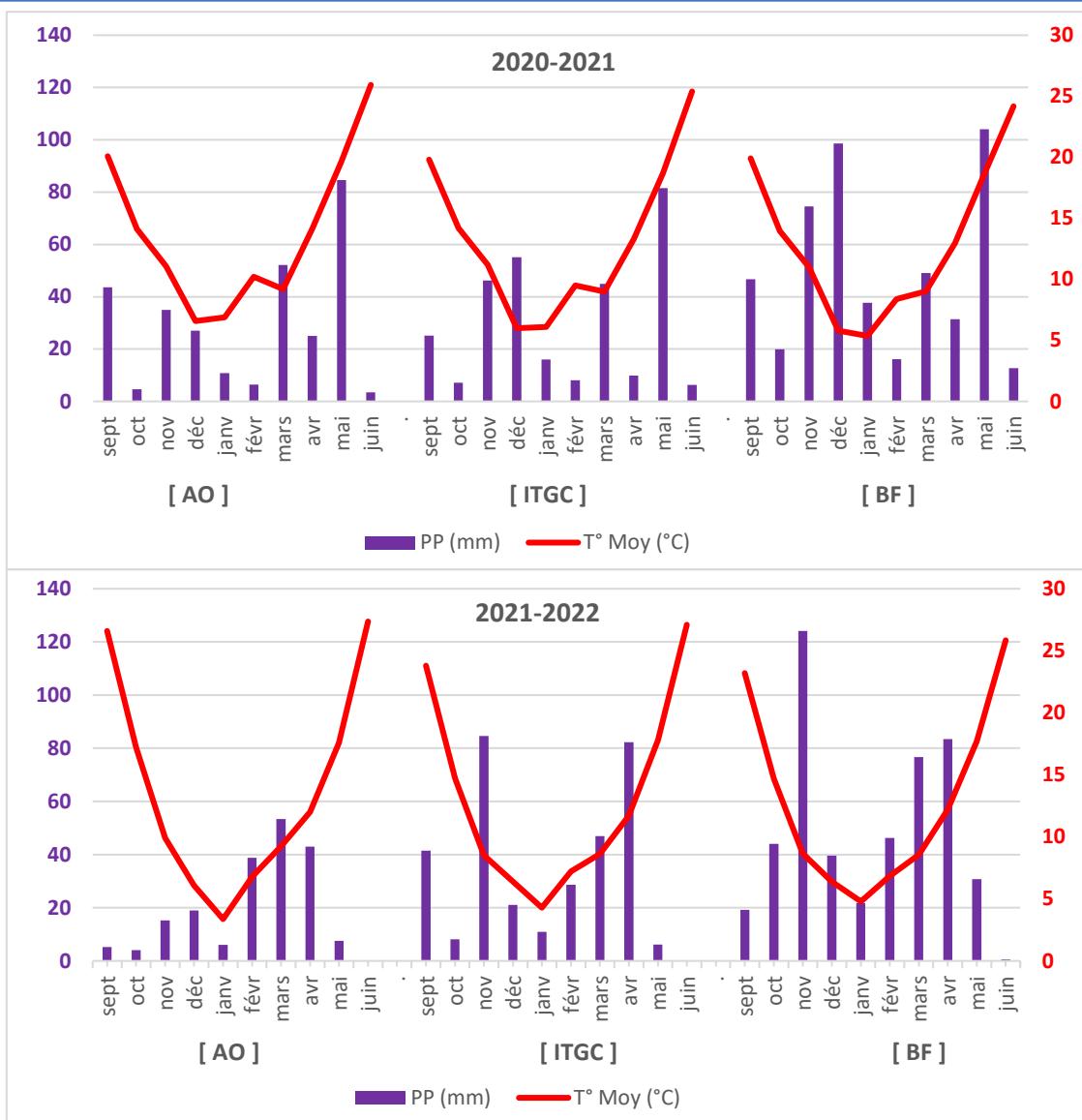


Figure 10: Analyse ombrothermique des précipitations et des températures moyennes mensuelles enregistrées au cours des deux campagnes des trois sites d'étude.

Beni Fouda a bénéficié d'une saison globalement favorable tout au long du cycle de la culture, à l'exception du mois de juin, qui coïncide avec le stade de maturité des grains.

2. Evaluation des paramètres physiologiques

Le tableau 2 présente les résultats de l'analyse de la variance (ANOVA) pour plusieurs paramètres physiologiques en fonction du génotype, du site et de l'année, ainsi que de leurs interactions.

CHAPITRE II : COMPORTEMENT AGRO-MORPHO-PHYSIOLOGIQUE DE QUELQUES GENOTYPES DE BLE DUR SOUS CLIMAT SEMI-ARIDE.

Tableau 2: Carrés moyens de l'analyse de la variance des variables physiologiques mesurées sur les deux compagnes

Source de variation	df	CHL	TRE	LWL	FE	TC
Génotype	2	123,29***	38,24 ^{ns}	0,0004 ^{ns}	21,74 ^{ns}	5,99***
Site	2	76,52***	424,80***	0,0239**	384,77***	16,48***
Année	1	4,28 ^{ns}	6039,55***	0,965***	9,55 ^{ns}	195,39***
Génotype x Site	4	0,70 ^{ns}	145,62***	0,024***	13,96 ^{ns}	2,14*
Génotype x Année	2	4,20 ^{ns}	90,01**	0,001 ^{ns}	67,52 ^{ns}	0,10 ^{ns}
Site x année	2	170,20***	147,72***	0,06 ***	485,40***	27,27***
Génotype x Site x Année	4	12,91 ^{ns}	209,31***	0,026***	63,93 ^{ns}	27,27***
Erreur	85	7,70	12,62	0,004	31,66	0,78

CLH : Teneur en chlorophylle, TRE : Teneur relative en eau, LWL : Vitesse de perte d'eau, FE : Fuite d'électrolytes, TC : Température du couvert végétale, ns : non significatif, * : significatif à 0,05, ** : significatif à 0,01, *** : significatif à 0,001.

2.1 Teneur en chlorophylle (CHL)

L'analyse de variance a révélé des effets très hautement significatives ($p<0,001$) des génotypes ainsi que des effets de sites durant les deux saisons de culture (Tableau 2). En revanche, les interactions entre Génotype x Site était non significative, concordent les résultats de Hashem et Al-Issawi, (2023) qui ont montré que le comportement génotypique étaient stables pour la teneur en chlorophylle à travers différents environnements. Durant la saison 2020-21, à Ain Oulmène, le taux de chlorophylle varie entre 47,22 spad pour Boussellam et 51,55 spad pour Oued El Bared avec une moyenne générale de 49,44 spad par rapport la saison 2021-22 qu'elle a enregistrée une moyenne variétale de 44,16 spad, soit une diminution de 10,68% au saison précédente. Ces variations inter-saisonnieres peuvent s'expliquer par la faible pluviométrie observée au cours de la deuxième saison, entraînant une réduction de la teneur en chlorophylle des feuilles en raison du stress hydrique accru.

Le génotype Oued El Bared a enregistré des valeurs maximales dans les trois sites d'études et durant les deux saisons culturales, suggérant une certaine stabilité de ce génotype. Cette capacité à maintenir un taux de chlorophylle élevé, caractéristique des variétés tolérantes à la sécheresse, pourrait être un indicateur de sa résilience aux variations environnementales. Yasir et *al.*, (2013) ont démontré que le stress hydrique entraîne une réduction de la teneur en chlorophylle chez certaines variétés de blé, en détruisant les pigments photosynthétiques et en inhibant leur synthèse. Cette diminution s'accentue avec l'intensité du stress. Les génotypes capables de maintenir des teneurs élevées en chlorophylle sous stress abiotique sont considérés comme plus tolérants que ceux dont la teneur en chlorophylle diminue fortement (Larouk et *al.*, 2021). Les variations de la teneur en chlorophylle ne sont pas

CHAPITRE II : COMPORTEMENT AGRO-MORPHO-PHYSIOLOGIQUE DE QUELQUES GENOTYPES DE BLE DUR SOUS CLIMAT SEMI-ARIDE.

uniquement dues au stress hydrique, mais varient aussi selon les génotypes. Une teneur élevée en chlorophylle favorise un meilleur rendement en grains en conditions de déficit hydrique (Ahmad et al., 2018). Toutefois, aucune différence significative entre les génotypes n'a été observée à ITGC et à Beni Fouda lors de la deuxième saison, ce qui suggère que les conditions environnementales dans ces sites étaient moins influentes sur les génotypes pour ce caractère. Une légère augmentation a été observée lors de la deuxième saison par rapport à la première, avec une hausse de +2,16 % à ITGC et +6,6 % à Beni Fouda. La stabilité de certains génotypes après floraison dans différents environnements est un critère clé pour leur sélection dans les programmes d'amélioration variétale (Epée Missé , 2018 ; Kalaji et al., 2016)

2.2 Teneur relative en eau (TRE)

La Détermination de la teneur relative en eau dans le blé dur est une mesure qui évalue la quantité d'eau contenue dans les tissus de la plante par rapport à leur capacité maximale de rétention en eau. Elle peut refléter plus étroitement l'équilibre entre l'apport d'eau à la feuille et le taux de transpiration (Chaimala et al., 2023). Cela influence la capacité de la plante à se remettre du stress et affecte par conséquent le rendement et la stabilité du rendement (Ichsan et al., 2022).

L'analyse de la variance a démontré des effets très hautement significatifs ($p<0,001$) pour le site, année et non significatif pour le génotype durant les deux campagnes de l'expérimentation 2020-21 et 2021-22 (Tableau 2). Des effets très significatif au seuil de 0,01% pour l'interaction génotypes X année et très hautement significative au seuil de 0,001 % entre Génotype X Site et Génotype X Site X Année. Cela souligne que la variation de la TRE dépend fortement du facteur environnemental (Année et Site). Le génotype Oued El Bared a enregistré les meilleures teneurs en eau à Ain Oulmène et à Beni Fouda pendant les deux campagnes agricoles. Le génotype Boussellam a marqué des teneurs en eau maximales à Beni Fouda avec 89,5 et 70,84% en 2020-21 et 2021-22, respectivement, tandis qu'il a enregistré les valeurs minimales à l'ITGC en 2021-22 ; cela suggère que le comportement variétal pour la teneur relative en eau est très associé aux conditions environnementales. Selon Campos et al, (2023) ; Kirigwi et Saha, (2022), les variations de la teneur relative en eau sont principalement influencées par l'environnement, et les plantes développent des adaptations morphologiques et physiologiques pour tolérer les stress environnementaux.

La TRE diminue significativement sous des conditions de sécheresse modérée et sévère. Cette réduction est liée à la fermeture des stomates pour limiter la perte d'eau par transpiration,

CHAPITRE II : COMPORTEMENT AGRO-MORPHO-PHYSIOLOGIQUE DE QUELQUES GENOTYPES DE BLE DUR SOUS CLIMAT SEMI-ARIDE.

ce qui affecte l'absorption et le transport des nutriments, les différences de réponse des plantes à la sécheresse sont davantage dues aux conditions climatiques et au sol qu'au potentiel génétique propre de chaque variété de blé (Wasaya *et al.*, 2021). L'association entre une TRE élevée et la tolérance à la sécheresse a déjà été démontrée dans plusieurs études (Marček *et al.*, 2019 ; Seleiman *et al.*, 2021 ; Ullah *et al.*, 2022), indiquant que les variétés résistantes maintiennent une meilleure hydratation en conditions de stress hydrique. L'expression de la tolérance à la sécheresse est le résultat d'une interaction entre facteurs environnementaux dominants et réponses physiologiques spécifiques aux génotypes. (Shah *et al.*, 2022). En conséquence, la TRE peut être utilisée comme un critère clé dans les programmes de sélection pour améliorer la tolérance du blé dur à la sécheresse, à condition qu'elle soit étudiée en interaction avec les facteurs environnementaux influençant sa variabilité.

2.3 Vitesse de perte d'eau (LWL)

L'analyse de la variance a démontré des effets de site très significatives ($p<0,01$) plus des effets de l'année ($p<0,001$) (Tableau 2), La vitesse de perte d'eau foliaire est principalement déterminée par l'année (les conditions environnementales annuelles), qui représente 59,57% de la variation totale. Le site et certaines interactions (notamment génotype x site et l'interaction triple) jouent également un rôle significatif, ce qui signifie que les réponses des plantes varient en fonction des conditions locales et de l'association entre génotype et environnement. En revanche, le génotype seul et son interaction avec l'année n'ont pas d'effet significatif sur la LWL. Selon Jin *et al.*, (2016), différents stress peuvent induire des réponses antagonistes, les plantes ouvrent leurs stomates pour diminuer la température des feuilles par transpiration lorsqu'elles sont soumises à la chaleur. Cependant, lorsqu'elles subissent simultanément la sécheresse et la chaleur, elles ne peuvent pas ouvrir leurs stomates Afin d'éviter une perte d'eau excessive. Par conséquent, la température des feuilles reste élevée. Il a été constaté qu'une combinaison de sécheresse et de chaleur modifie le métabolisme des plantes d'une manière unique, contrairement à l'effet de différents stress seuls (Prasch et Sonnewald, 2013). La sécheresse et la chaleur induisent une perte d'eau par transpiration anormale, qui a un effet de refroidissement mais provoque également une dessiccation rapide des cellules.

Les mécanismes d'évitement de la déshydratation impliquent le maintien d'un état hydrique élevé (favorable) de la plante pendant le stress. Ces stratégies comprennent une perte d'eau minimisée (Ex : fermeture des stomates, réduction de la surface foliaire et sénescence des feuilles plus anciennes) ou une perte d'eau maximale permise par une prolifération accrue des racines à des profondeurs où l'eau est disponible (Lopes *et al.*, 2011). Par conséquent, une

CHAPITRE II : COMPORTEMENT AGRO-MORPHO-PHYSIOLOGIQUE DE QUELQUES GENOTYPES DE BLE DUR SOUS CLIMAT SEMI-ARIDE.

réserve d'eau élevée et une faible perte d'eau pourraient être attribuées à la résistance de la plante aux stress.

À Ain Oulmène, l'analyse des moyennes a révélé des différences significatives entre les génotypes en 2020-21 (Tableau 2). Boussellam et Oued El Bared ont montré une meilleure rétention en eau, avec des valeurs de $0,084 \text{ mg.cm}^{-2}.\text{min}^{-1}$ et $0,097 \text{ mg.cm}^{-2}.\text{min}^{-1}$, respectivement, comparées à GTA dur, qui a enregistré une perte d'eau plus élevée ($0,106 \text{ mg.cm}^{-2}.\text{min}^{-1}$), pour une moyenne générale de $0,096 \text{ mg.cm}^{-2}.\text{min}^{-1}$.

À l'ITGC, BOS et GTA dur ont présenté les niveaux maximaux de perte en eau par rapport à OB au cours de la première saison, la seconde saison, GTA dur a perdu plus.

À Beni Fouda, en revanche, Boussellam a affiché une perte en eau plus importante sur les deux années, tandis que GTA dur a maintenu des niveaux hydriques plus stables et acceptables en comparaison avec d'autres génotypes.

Par ailleurs, la deuxième saison a enregistré une augmentation globale du LWL dans les trois sites par rapport à la première saison, indiquant que les variations de LWL ne sont pas uniquement liées au site ou à l'année de manière indépendante, mais bien à leur interaction. L'effet du site a été plus marqué en année 2, amplifiant ainsi les différences de LWL entre les sites.

2.4 Fuite des électrolytes (FE)

L'analyse de variance (ANOVA) réalisée sur la fuite d'électrolytes (FE) met en évidence l'impact des facteurs environnementaux et génétiques sur cette variable physiologique (Tableau 2). Les résultats montrent que l'effet du site est très hautement significatif ($p<0,001$), indiquant une forte influence des conditions agro-climatiques locales sur la stabilité membranaire des cellules végétales. Selon Gnofam et al., (2014), le stress hydrique augmente la perméabilité membranaire, entraînant une fuite accrue d'électrolytes. Les membranes cellulaires sont les premières cibles des stress abiotiques, notamment la sécheresse. Leur intégrité et stabilité sont des facteurs déterminants dans la tolérance des plantes au stress hydrique (Maghsoudi et al., 2016). En revanche, le génotype et l'année n'ont pas d'effet significatif, suggérant que la variabilité génétique étudiée ne joue pas un rôle déterminant dans la régulation de la FE dans ces conditions expérimentales. Concernant les interactions, seule l'interaction Site x Année est significative ($p< 0.001$), révélant que l'effet du site varie selon les conditions climatiques spécifiques de chaque année. Cela pourrait être lié à des variations inter-annuelles de

CHAPITRE II : COMPORTEMENT AGRO-MORPHO-PHYSIOLOGIQUE DE QUELQUES GENOTYPES DE BLE DUR SOUS CLIMAT SEMI-ARIDE.

température, d'humidité ou d'autres facteurs abiotiques influençant l'intégrité membranaire des cellules végétales. L'absence d'interaction significative entre le génotype et le site ou entre le génotype et l'année indique que la réponse des génotypes à la FE est relativement stable quelle que soit l'environnement. Ainsi, ces résultats suggèrent que l'amélioration de la tolérance au stress via la réduction de la FE pourrait passer davantage par l'optimisation des conditions de culture et la sélection de sites adaptés plutôt que par la sélection génétique seule.

ElBasyoni *et al.*, (2017), démontré que sous stress thermique, la chaleur endommage les protéines membranaires et altère la fluidité de la membrane, ce qui réduit la capacité des cellules à réguler leur contenu en eau et en nutriments. Un excès de fuite d'électrolytes entraîne une réduction du contenu relatif en eau (TRE) des feuilles et une altération des processus physiologiques tels que la photosynthèse. Les cultivars ayant une fuite d'électrolytes plus élevée sous stress ont également enregistré une baisse significative de leur rendement, notamment en termes de grains par épi, poids des grains et rendement en biomasse (Aouz *et al.*, 2023).

2.5 La température du couvert végétal TC (°C)

La température du couvert végétal reflète indirectement le taux de transpiration et l'ouverture des stomates, permettant ainsi d'évaluer les différences entre génotypes face à la sécheresse (El Haddad *et al.*, 2021). L'analyse de la variance (ANOVA) a révélé plusieurs facteurs influençant significativement la température du couvert végétal (Tableau 2). L'effet principal le plus déterminant est l'année, il explique 49,64% de la variabilité observée, avec un effet très hautement significatif ($p<0,001$). Cela suggère que les variations climatiques interannuelles ont un impact majeur sur la température du couvert végétal.

Selon Fellahi *et al.* (2024), les cultivars présentant un rendement biologique plus élevé affichaient un couvert végétal plus frais, un meilleur statut hydrique et une teneur en chlorophylle accrue. Ces caractéristiques leur ont permis de mieux résister au déficit hydrique post-anthèse et au stress thermique. Les effets du site et du génotype sont également très hautement significatifs ($p<0,001$). De plus, l'interaction Génotype x Site x Année ($p<0,001$) est significative, indiquant que la réponse thermique des génotypes varie selon les sites et les années. Cela souligne l'importance des conditions climatiques et édaphiques spécifiques à chaque environnement.

L'analyse comparative des moyennes a révélé des différences significatives entre les génotypes dans les différents environnements (Tableau 3). Boussellam a présenté les

CHAPITRE II : COMPORTEMENT AGRO-MORPHO-PHYSIOLOGIQUE DE QUELQUES GENOTYPES DE BLE DUR SOUS CLIMAT SEMI-ARIDE.

températures minimales du couvert végétal lors de la première saison à Ain Oulmène et à l'ITGC (27,31 et 27,62 °C, respectivement), tandis que à Beni Fouda, il a enregistré une température plus élevée, atteignant 32,53 °C en 2020-21. En revanche, Oued El Bared a affiché les températures maximales au cours de la deuxième saison à Ain Oulmène et à l'ITGC. Une augmentation générale de la température du couvert végétal a été observée durant la seconde saison dans les trois sites d'étude. Ces résultats indiquent que le comportement variétal vis-à-vis de la température du couvert était plus favorable en 2020-21 qu'en 2021-22.

Ces résultats suggèrent que les génotypes de blé dur ayant une température du couvert plus basse pourraient présenter des taux de transpiration plus élevés, favorisant ainsi une augmentation du rendement dans des environnements soumis au stress hydrique (Guendouz *et al.*, 2012 ; Wen *et al.*, 2023).

CHAPITRE II : COMPORTEMENT AGRO-MORPHO-PHYSIOLOGIQUE DE QUELQUES GENOTYPES DE BLE DUR SOUS CLIMAT SEMI-ARIDE.

Tableau 3: Valeurs moyennes des paramètres physiologiques mesurés pour les génotypes.

Paramètres		CHL		TRE		LWL		FE		TC	
Site		AO									
Génotypes	Saisons	20-21	21-22	20-21	21-22	20-21	21-22	20-21	21-22	20-21	21-22
BOS AO		47,22 ^b	42,8 ^b	79,77 ^b	64,39 ^b	0,084 ^b	0,239 ^a	97,76 ^a	84,72 ^a	27,31 ^b	33,72 ^a
OB AO		51,55 ^a	46,25 ^a	82,31 ^a	74,80 ^a	0,097 ^{ab}	0,255 ^a	95,85 ^{ab}	89,13 ^a	29,75 ^a	34,03 ^a
GTA AO		49,57 ^{ab}	43,42 ^b	81,92 ^a	62,3 ^b	0,106 ^a	0,184 ^a	94,88 ^b	90,92 ^a	28,85 ^a	33,82 ^a
Moyenne		49,44	44,16	81,33	67,19	0,096	0,226	96,16	88,26	28,64	33,86
LSD 5%		3,34	2,59	1,93	8,59	0,016	0,088	1,92	14,36	1,36	1,37
CV %		5,24	4,58	1,62	8,76	11,44	26,78	1,37	11,18	3,25	3,47
Taux diff %		-10,68		-17,38		+135,42		-8,22		+18,23	
Paramètres		CHL		TRE		LWL		FE		TC	
Site		ITGC									
Génotypes	Saisons	20-21	21-22	20-21	21-22	20-21	21-22	20-21	21-22	20-21	21-22
BOS ITGC		46,27 ^b	50,28 ^a	92,22 ^a	65,17 ^c	0,078 ^a	0,248 ^b	85,76 ^{ab}	87,44 ^a	27,62 ^b	31,82 ^b
OB ITGC		51,62 ^a	51,62 ^a	85,39 ^b	75,13 ^b	0,042 ^b	0,398 ^{ab}	79,47 ^b	87,80 ^a	29,18 ^a	32,42 ^a
GTA ITGC		49,23 ^{ab}	48,4 ^a	87,95 ^{ab}	84,70 ^a	0,069 ^a	0,463 ^a	89,49 ^a	84,87 ^a	30,02 ^a	31,84 ^b
Moyenne		49,04	50,1	88,51	75,00	0,064	0,369	84,91	86,70	28,93	32,03
LSD 5%		4,31	3,55	5,09	3,48	0,020	0,159	6,43	13,36	1,02	0,45
CV %		6,83	5,51	3,95	3,18	22,27	29,51	5,19	10,57	2,42	1,20
Taux diff %		+2,16		-15,26		+476,56		+2,11		+10,72	
Paramètres		CHL		TRE		LWL		FE		TC	
Site		BF									
Génotypes	Saisons	20-21	21-22	20-21	21-22	20-21	21-22	20-21	21-22	20-21	21-22
BOS BF		45,22 ^a	46,43 ^a	89,50 ^a	70,81 ^a	0,102 ^a	0,357 ^a	86,06 ^b	96,06 ^a	32,53 ^a	31,15 ^c
OB BF		47,3 ^a	48,82 ^a	91,88 ^a	65,71 ^a	0,093 ^a	0,210 ^b	86,42 ^b	96,95 ^a	32,23 ^b	32,26 ^b
GTA BF		45,12 ^a	51,48 ^a	86,59 ^b	66,95 ^a	0,067 ^b	0,250 ^{ab}	90,77 ^a	94,43 ^a	30,7 ^b	33,49 ^a
Moyenne		45,88	48,91	89,32	67,82	0,087	0,272	87,75	95,81	31,48	32,23
LSD 5%		3,28	3,25	2,82	7,73	0,025	0,118	3,35	3,81	0,64	1,90
CV %		5,56	5,16	2,16	7,81	19,68	29,87	2,62	2,73	1,39	1,90
Taux diff %		+6,60		-24,07		+212,64		+9,18		+36,69	

CLH : Teneur en chlorophylle, TRE : Teneur relative en eau, LWL : Vitesse de perte d'eau, FE : Fuite d'électrolytes, TC : Température du couvert végétale, ns : non significatif, * : significatif à 0,05, ** : significatif à 0,01, *** : significatif à 0,001.

CHAPITRE II : COMPORTEMENT AGRO-MORPHO-PHYSIOLOGIQUE DE QUELQUES GENOTYPES DE BLE DUR SOUS CLIMAT SEMI-ARIDE.

3. Evaluation des paramètres phéno-morphologiques

Le tableau 4 présente les résultats de l'analyse de la variance (ANOVA) pour plusieurs paramètres phéno-morphologiques en fonction du génotype, du site et de l'année, ainsi que de leurs interactions.

Tableau 4: Carrés moyens de l'analyse de la variance des variables phéno-morphologiques mesurées sur les deux compagnes.

Source de variation	df	NJE	SF	PSF	HP
Génotype	2	146***	0,30 ^{ns}	1,18x10 ^{-6 ns}	70,40*
Site	2	470,05***	12,93 ^{ns}	1,36x10 ^{-4*}	86,54**
Année	1	21,40*	109,76***	0,002***	2950,19***
Génotype x Site	4	45,05***	8,74 ^{ns}	2,90x10 ^{-5 ns}	116,15***
Génotype x Année	2	23,40**	0,98 ^{ns}	1,20x10 ^{-5ns}	5,83 ^{ns}
Site x Année	2	9,46 ^{ns}	282,43***	3,49x10 ^{-4***}	1785,88***
Génotype x Site x Année	4	12,79*	45,01**	5,81x10 ^{-5*}	30,95 ^{ns}
Erreur	68	3,93	8,90	2,06x10 ⁻⁵	14,38

NJE : nombre de jours à l'épiaison, SF : Surface foliaire, PSF : Poids spécifique foliaire, HP : Hauteur de la plante, ns : non significatif, * : significatif à 0,05, ** : significatif à 0,01, *** : significatif à 0,001.

3.1 Nombre de jours à l'épiaison (NJE)

L'analyse de variance (ANOVA) révèle que le site, le génotype et l'année influencent significativement le nombre de jours à l'épiaison, avec un effet prédominant du site ($p<0,001$) (Tableau 4). Les interactions Génotype x Site et Génotype x Année sont également significatives, indiquant une variabilité en fonction des conditions environnementales et interannuelles. L'interaction Génotype x Site x Année ($p<0,05$) suggère une influence combinée de ces facteurs. Ces résultats soulignent l'importance de sélectionner des génotypes adaptés aux conditions agro-climatiques spécifiques Afin d'optimiser la gestion et la productivité des cultures. Les cultivars à floraison précoce, peuvent être utilisés pour créer des variétés à maturation rapide, permettant d'éviter les effets négatifs de déficit hydrique pendant le remplissage du grain (Bekaddour et al., 2024).

Durant la première saison, le NJE variait entre 136,33 jours pour Boussellam de Beni Fouda à 149,67 jours pour Oued El Bared à Ain Oulmène avec une différence inter-sites très hautement significatif ($p<0,001$), où Ain Oulmène a enregistré une moyenne de 146,93 jours par rapport à ITGC et BF qu'ils ont présenté des moyennes de 143,5 et 137,14 jours.

Les valeurs du NJE varient selon les génotypes et les sites (Tableau 5). Pour le site AO,

CHAPITRE II : COMPORTEMENT AGRO-MORPHO-PHYSIOLOGIQUE DE QUELQUES GENOTYPES DE BLE DUR SOUS CLIMAT SEMI-ARIDE.

les génotypes BOS, OB et GTA affichent des NJE moyens oscillant entre 144,67 pour BOS en première saison et 149,8 jours pour OB et GTA dur en deuxième saison et avec taux de différence équitable (-0,09%). En revanche, sur le site ITGC, le génotype OB présente une différence plus marquée entre les saisons (146,67 jours en 2020-21 contre 139,6 jours en 2021-22), avec un taux de différence global négatif de (-2,07%). Le site BF affiche globalement les valeurs de NJE les plus faibles, avec des moyennes comprises entre 136,33 jours pour BOS en 2020-21 et 138,4 jours pour GTA dur en seconde saison, avec une variation saisonnière négligeable (-0,60%). Selon Guendouz et *al*, (2013), la précocité joue un rôle essentiel dans la stabilité du rendement du blé dur en zones arides. Selon Nabil et *al*, (2021), la diversité intra- et interspécifique en termes d'épiaison offre une large possibilité de choix variétal selon les zones de culture. Ces résultats sont cohérents avec les observations des agriculteurs algériens, qui privilégièrent l'orge dans les zones arides où la sécheresse arrive plus tôt.

3.2 Surface foliaire (SF)

Une forte influence de l'année sur la surface foliaire ($p<0.001$) (Tableau 4), ainsi que l'interaction significative Site x Année ($p<0.001$), suggèrent que les variations climatiques, notamment la température et les précipitations, ont un impact majeur sur le développement foliaire. Selon (Guendouz et *al*, 2016), la surface foliaire influence directement la productivité des cultures, car une plus grande surface permet une meilleure interception de la lumière et une assimilation accrue du carbone. Cependant, dans des conditions de sécheresse, une réduction de la surface foliaire peut être un mécanisme d'adaptation visant à limiter les pertes hydriques (Ould Amer et *al*, 2023).

L'interaction significative Génotype x Site x Année ($p<0.001$) confirme que les performances foliaires varient en fonction des conditions agro-climatiques et du matériel génétique. Des études antérieures ont montré que la stabilité de la surface foliaire est un critère important dans la sélection des variétés tolérantes au stress hydrique (Biswal et *al*, 2013, Wang et *al*, 2022).

À Ain Oulmène, la surface foliaire varie de 16,30 cm² pour OB à 17,09 cm² pour GTA dur, avec une moyenne générale de 16,69 cm² en 2020-21 (Tableau 5). La seconde saison (2021-22) a enregistré une hausse significative de +11,92%, bien que les différences entre génotypes restent faibles, avec une moyenne générale atteignant 18,68 cm².

CHAPITRE II : COMPORTEMENT AGRO-MORPHO-PHYSIOLOGIQUE DE QUELQUES GENOTYPES DE BLE DUR SOUS CLIMAT SEMI-ARIDE.

À l'ITGC, la surface foliaire a été nettement plus réduite, avec une moyenne de 13,38 cm² en 2020-21, variant de 11,97 cm² pour OB à 14,6 cm² pour BOS. En revanche, une augmentation remarquable de +49,77% a été observée en 2021-22, traduisant une meilleure expression du caractère dans des conditions plus favorables. La faible surface foliaire initialement enregistrée sur ce site pourrait être attribuée à des conditions plus stressantes, telles qu'un déficit hydrique ou des températures élevées, limitant le développement foliaire.

À Beni Fouda, la surface foliaire a suivi une tendance inverse, avec une baisse globale de -10,65% entre les deux campagnes agricoles. Cette diminution a été particulièrement marquée chez OB (-6,31 cm²), tandis que GTA dur a connu une réduction plus modérée, alors que BOS a légèrement progressé. Ces variations témoignent de la sensibilité des génotypes aux conditions agro-climatiques spécifiques de chaque site. Selon Hussain et *al*, (2019), les conditions de sécheresse et de stress thermique ont réduit la surface foliaire et l'accumulation de biomasse, ce qui a finalement entraîné une diminution du rendement.

3.3 Poids spécifique foliaire (PSF)

La différence des moyennes à Ain Oulmène montre une augmentation entre les deux saisons (2020-21 et 2021-22) (Tableau 5). En effet, les valeurs de PSF ont progressé pour les trois génotypes étudiés : BOS est passé de 0,023 à 0,031, OB de 0,024 à 0,029, et GTA de 0,025 à 0,030. Cette augmentation est également confirmée par le taux de différence de +25 %. Bien que les variations entre les génotypes soient faibles, elles restent non significatives.

À ITGC, le poids spécifique foliaire a augmenté entre 2020-21 et 2021-22 pour tous les génotypes, avec une hausse de 0,007 pour BOS (0,024 à 0,031), de 0,003 pour OB (0,026 à 0,029) et de 0,007 pour GTA (0,027 à 0,034). Cette augmentation globale de +23,08 % est significative ($p<0,05$), indiquant un effet année sur la densité foliaire.

À Beni Fouda (BF), le poids spécifique foliaire a fortement augmenté entre les saisons 2020-21 et 2021-22, affichant une hausse globale de +73,91%. Cette augmentation est observée pour tous les génotypes : BOS a augmenté de +52%, OB a agrandi avec +130% et GTA dur avec +68%, tous les génotypes ont eu une performance intra-site similaire. Ces variations interannuelles sont statistiquement significatives, traduisent une influence marquée des conditions environnementales plutôt que par des différences génétiques entre les génotypes sur la densité foliaire (Tableau 4). Ces résultats sont en concordance avec Chahbar et Belkhodja, (2016), qui affirme que l'effet du stress hydrique est plus déterminant que les différences entre

CHAPITRE II : COMPORTEMENT AGRO-MORPHO-PHYSIOLOGIQUE DE QUELQUES GENOTYPES DE BLE DUR SOUS CLIMAT SEMI-ARIDE.

variétés. Par conséquent, l'augmentation du PSF sous stress hydrique peut être une stratégie adaptative, les feuilles devenant plus épaisses et plus denses pour limiter la perte d'eau. Selon Benalia 2024, Le poids spécifique foliaire (PSF) est un indicateur de la densité et de la fonctionnalité des feuilles, influençant directement la photosynthèse et la résistance au stress.

3.4 Hauteur de la plante (HP)

A Ain Oulmène, en 2020-21, OB et GTA dur ont montré la hauteur la plus élevée (69 et 66,23 cm, respectivement), tandis que BOS avait la plus faible (54,84 cm). En 2021-22, les différences génotypiques sont moins marquées, avec des hauteurs proches (83,28 cm à 85,41 cm). Une augmentation notable de la hauteur des plantes (+32,82%) entre les deux campagnes confirme l'effet significatif du site ($p < 0,01$) sur cette variation (Tableau 4).

À l'ITGC, la hauteur moyenne des plantes a fortement augmenté (+56,16%), passant de 54,75 cm (2020-21) à 85,50 cm (2021-22). En 2020-21, BOS était le plus haut (58,67 cm) et GTA dur le plus court (51,24 cm). L'année suivante, OB a atteint la plus grande hauteur (89,39 cm) sans différence significative avec GTA dur (84,33 cm), alors que BOS a enregistré une hauteur réduite (82,77 cm). Cette variation significative entre génotypes ($p < 0,05$) souligne que certains performent mieux que d'autres, mais leur performance varie selon le site (Tableau 4).

À l'inverse, à Beni Fouda, la hauteur moyenne des plantes a diminué de 9,65% entre 2020-21 (77,12 cm) et 2021-22 (69,68 cm), suggérant des conditions moins favorables lors de la deuxième saison. En 2020-21, BOS a atteint la plus grande hauteur (81,12 cm), tandis que GTA dur était le plus court (73,53 cm). En 2021-22, BOS et OB ont atteint les hauteurs les plus élevées (74,32 et 70,93 cm, respectivement), alors que GTA dur est resté le plus court (63,79 cm).

Ces résultats mettent en évidence l'importance des interactions Génotype x Site, confirmant, selon Frih et *al.*, (2022) que la performance d'un génotype dépend fortement des conditions environnementales. L'adaptation au milieu apparaît ainsi comme un facteur clé pour optimiser ce trait (Oumata et *al.*, 2023). D'après Haddad et *al.*, (2021), L'évolution des variétés de blé dur en Algérie a conduit à une réduction significative de la hauteur des plantes, avec un impact positif sur le rendement en grains. Cependant, dans les environnements secs, les variétés plus hautes restent avantageuses en raison de leur meilleure tolérance au stress hydrique et thermique. La hauteur de la plante est un critère fondamental pour la sélection des variétés de blé, en particulier dans les zones arides (Benmohammed 2005 ; Atoui et *al.*, 2021). Selon Allam

CHAPITRE II : COMPORTEMENT AGRO-MORPHO-PHYSIOLOGIQUE DE QUELQUES GENOTYPES DE BLE DUR SOUS CLIMAT SEMI-ARIDE.

et al. (2015) ; Bourouh et al, (2023), les variétés à paille haute sont considérées comme plus tolérantes à la sécheresse grâce à leur capacité à stocker et remobiliser les assimilats de la tige vers les grains en cas de déficit hydrique terminal.

Tableau 5: Comparaison des moyennes des variables phéno-morphologiques mesurées sur deux compagnes et trois sites

Paramètres		NJE		SF		PSF		HP	
Site		AO							
Génotypes	Saisons	20-21	21-22	20-21	21-22	20-21	21-22	20-21	21-22
BOS AO		144,67 ^a	141 ^b	16,70 ^a	18,62 ^a	0,023 ^a	0,031 ^a	54,84 ^b	83,28 ^a
OB AO		149,67 ^a	149,8 ^a	16,30 ^a	18,72 ^a	0,024 ^a	0,029 ^a	69 ^a	85,41 ^a
GTA AO		146,67 ^a	149,8 ^a	17,09 ^a	18,71 ^a	0,025 ^a	0,030 ^a	66,23 ^a	83,79 ^a
Moyenne		147	146,87	16,69	18,68	0,024	0,030	63,36	84,16
LSD 5%		8,27	1,97	4,26	6,16	0,007	0,005	10,96	8,58
CV %		2,48	0,92	17,51	22,63	20,16	11,89	7,63	6,99
Taux diff %		-0,09		+11,92		+25		+32,82	
Paramètres		NJE		SF		PSF		HP	
Site		ITGC							
Génotypes	Saisons	20-21	21-22	20-21	21-22	20-21	21-22	20-21	21-22
BOS ITGC		138,67 ^b	137,6 ^b	14,6 ^a	17,10 ^b	0,024 ^a	0,031 ^a	58,67 ^a	82,77 ^b
OB ITGC		146,67 ^a	139,6 ^b	11,97 ^b	23,61 ^a	0,026 ^a	0,029 ^a	54,33 ^{ab}	89,39 ^a
GTA ITGC		138,67 ^b	148,8 ^a	13,57 ^{ab}	19,39 ^b	0,027 ^a	0,034 ^a	51,24 ^b	84,33 ^b
Moyenne		145	142	13,38	20,04	0,026	0,032	54,75	85,50
LSD 5%		5,92	3,14	1,62	3,16	0,003	0,006	5,14	3,59
CV %		20,09	1,52	8,29	10,81	7,37	13,53	4,14	3,26
Taux diff %		-2,07		+49,77		+23,08		+56,16	
Paramètres		NJE		SF		PSF		HP	
Site		BF							
Génotypes	Saisons	20-21	21-22	20-21	21-22	20-21	21-22	20-21	21-22
BOS BF		136,33 ^a	137,2 ^a	18,36 ^b	19,51 ^a	0,025 ^a	0,038 ^a	81,12 ^a	74,32 ^a
OB BF		138 ^a	134,6 ^b	20,44 ^a	14,13 ^b	0,020 ^a	0,046 ^a	76,71 ^{ab}	70,93 ^a
GTA BF		138,33 ^a	138,4 ^a	18,08 ^b	17,19 ^{ab}	0,022 ^a	0,037 ^a	73,53 ^b	63,79 ^b
Moyenne		137,56	136,73	18,96	16,94	0,023	0,040	77,12	69,68
LSD 5%		3,02	1,81	1,88	4,45	0,009	0,009	5,01	5,37
CV %		4,16	0,91	6,78	18,03	28,62	16,77	2,87	5,99
Taux diff %		-0,60		-10,65		+73,91		-9,65	

*BOS : Boussellam, OB : Oued El Bared, GTA : GTA dur, AO Ain Oulmène, ITGC : Expérimentations de ITGC, BF : Beni Fouda, NJE : nombre de jours à l'épiaison, SF : Surface foliaire, PSF : Poids spécifique foliaire, HP : Hauteur de la plante, ns : non significatif, * : significatif à 0,05, ** : significatif à 0,01, *** : significatif à 0,001.*

4. Evaluation des paramètres agronomiques

L'analyse de la variance des paramètres agronomiques du blé dur montre des différences significatives entre les génotypes, les sites et les années pour plusieurs traits étudiés (Tableau 6). Le facteur "génotype" influence significativement le nombre d'épis par mètre carré, tandis que son effet est non significatif sur le rendement en grains et la biomasse. L'effet du site et de

CHAPITRE II : COMPORTEMENT AGRO-MORPHO-PHYSIOLOGIQUE DE QUELQUES GENOTYPES DE BLE DUR SOUS CLIMAT SEMI-ARIDE.

l'année est hautement significatif pour la majorité des paramètres, notamment le poids de mille grains, le nombre d'épis et le nombre de grains par épi. L'interaction génotype x année révèle un effet significatif sur le rendement en grains et le poids de mille grains.

Tableau 6: Carrés moyens de l'analyse de la variance des variables agronomiques.

Source de variation	df	RDT	PMG	NEm⁻²	NGE⁻¹	BIO	IR
Génotype	2	20,09 ^{ns}	6,42 ^{ns}	18914,19***	8,04 ^{ns}	895,55 ^{ns}	285,30*
Site	2	844,18***	5,11 ^{ns}	34350,22***	231,71***	1951,12*	1272,8***
Année	1	41,07*	6635,2***	359477,4***	277,57***	1612,42 ^{ns}	0,68 ^{ns}
Génotype x Site	4	32,16**	7,89 ^{ns}	1845,33 ^{ns}	9,10 ^{ns}	277,42 ^{ns}	74,99 ^{ns}
Génotype x Année	2	156,22***	68,06**	27088,01***	33,95*	846,51 ^{ns}	8,68 ^{ns}
Site x Année	2	466,30***	95,40**	5678,07**	110,90**	4595,3***	19,74 ^{ns}
Génotype x Site x Année	4	16,98 ^{ns}	18,04 ^{ns}	5688,76***	5,59 ^{ns}	198,25 ^{ns}	3,72 ^{ns}
Erreur	34	8,18	11,24	874,06	13,51	396,48	57,59

*RDT : Rendement en grain, PMG : Poids ce 1000 grains, NEm⁻² : Nombre épis par mètre carré, NGE⁻¹ : Nombre grains par épi, Bio : Biomasse, IR : Indice de récolte, ns : non significatif, * : significatif à 0,05, ** : significatif à 0,01, *** : significatif à 0,001.*

4.1 Rendement en grains (RDT)

A Ain Oulmène, En 2020-21, le génotype BOS a obtenu le rendement le plus élevé (26,09 q.h⁻¹) par rapport aux GTA dur et OB (23,14 et 22,91 q.h⁻¹) (Tableau 7). En 2021-22, le rendement a augmenté pour tous les génotypes, sauf pour BOS, qui a légèrement diminué (24,61 q.h⁻¹). Le génotype GTA dur a montré une nette amélioration (28,70 q.h⁻¹), devenant ainsi le plus productif. La moyenne des rendements a évolué de 24,05 q.h⁻¹ en 2020-21 à 26,19 q.h⁻¹ en 2021-22, indiquant une augmentation globale significative ($p<0,05$) du rendement de +8,90%.

A l'ITGC, en 2020-21, les génotype BOS et OB avaient les rendements les plus élevés (26,77 et 25,97 q.h⁻¹, respectivement) GTA dur se démarqué moins productif (19,56 q.h⁻¹). En 2021-22, tous les génotypes ont vu leur rendement augmenter, avec une forte progression pour GTA dur (40,14 q. ha⁻¹) et OB AO (39,21 q.h⁻¹), tandis que BOS a connu une hausse plus modérée (28,11 q. ha⁻¹). La moyenne du rendement a augmenté de 24,10 q.h⁻¹ en 2020-21 à 35,82 q.h⁻¹ en 2021-22, soit une hausse de +48,63%.

A Beni Fouda, en 2020-21, BOS et GTA dur ont donné les meilleurs rendements (44,69 et 43,44 q.h⁻¹, respectivement), tandis que OB a produit moins avec 40,72 q.h⁻¹. En 2021-22, tous les génotypes ont enregistré une baisse du rendement. GTA dur est devenu le plus

CHAPITRE II : COMPORTEMENT AGRO-MORPHO-PHYSIOLOGIQUE DE QUELQUES GENOTYPES DE BLE DUR SOUS CLIMAT SEMI-ARIDE.

performant avec $39,36 \text{ q.h}^{-1}$, tandis que BOS et OB sont révélés statistiquement similaires avec ($31,63$ et $31,98 \text{ q.h}^{-1}$, respectivement). Une diminution significative ($p<0,05$) en 2021-22 représente une baisse de 20,09% comparée à la saison précédente. Toutefois, Beni Fouda reste la région la plus productive, avec un rendement moyen de $38,63 \text{ q.h}^{-1}$, supérieur à l'ITGC et Ain Oulmène de 22,44 et 35%, respectivement.

De plus, une différence inter-sites très hautement significative a été observée ($p<0,001$) (Tableau 6). Ces résultats montrent que le site est le facteur le plus déterminant, expliquant 47,83% de la variabilité totale du rendement en grain. Ce résultat souligne l'influence prépondérante des conditions climatiques (fluctuation des précipitations, température relativement élevée), édaphiques (teneur en matières organique, structure du sol..) et pratiques culturelles (fertilisation, irrigation, travail du sol) des sites expérimentaux sur la performance des génotypes.

Selon Kourat et *al.*, (2021), les températures élevées durant la floraison réduisent le rendement en grain en limitant la formation des grains. Les hauts plateaux semi-arides offrent une meilleure qualité de grain, tandis que les régions avec plus de précipitations favorisent un meilleur rendement (Derbal et *al.*, 2015). Les résultats de Nadjim et *al.*, (2017), indiquent que 17 % des précipitations à Béni Fouda sont tombées entre la floraison et le remplissage du grain, entraînant un stress hydrique sévère.

Selon Gagliardi et *al.*, (2023), l'itinéraire technique joue un rôle essentiel dans l'optimisation de la production agricole, en influençant à la fois le rendement, la gestion des mauvaises herbes, l'impact environnemental et la rentabilité économique.

La sécheresse et le stress thermique étant des facteurs limitants majeurs, notamment durant le remplissage du grain. Les avancées technologiques en agriculture ont un impact limité sur la stabilité des rendements, à l'exception du blé tendre, où elles contribuent à 40 % de sa stabilité (Benmehaia et *al.*, 2020).

L'interaction Génotype x Site est significative ($p<0,01$) et explique 3,64% de la variabilité. Cela signifie que certains génotypes performent mieux dans certains sites que dans d'autres. Cette interaction est essentielle dans le cadre des stratégies d'amélioration variétale, car elle indique que le choix du génotype doit être fait en fonction du site de culture et non de manière généralisée.

CHAPITRE II : COMPORTEMENT AGRO-MORPHO-PHYSIOLOGIQUE DE QUELQUES GENOTYPES DE BLE DUR SOUS CLIMAT SEMI-ARIDE.

Selon Bahlouli et *al*, (2005) L'effet du génotype ne reflète pas toujours la véritable performance d'une variété, notamment dans les environnements semi-arides, caractérisés par une forte variabilité climatique intra et interannuelle. Il est généralement associé au remplissage des grains, et il a un impact direct sur le rendement en grain

4.2 Poids de mille grains (PMG)

Le poids de mille grains est un indicateur clé de la qualité et du rendement du blé dur. Il reflète la taille et la densité des grains, influençant directement la productivité

À Ain Oulmène, en 2020-21, le tableau 7 présente l'analyse des moyennes entre les génotypes, où il affiche que les génotypes Boussellam et GTA dur avaient les PMG les plus élevés (52,08 g et 51,32 g, respectivement), tandis que Oued El Bared atteindrait 48,14 g, avec une moyenne générale de 50,32 g. Lors de la deuxième saison, la moyenne du PMG a chuté à 26,94 g, soit une baisse significative de 46,66 %, avec des PMG inférieurs et plus homogènes entre les génotypes. Semcheddine, (2020) a révélé que le stress hydrique a réduit le PMG de 5 % en moyenne. Ces résultats soulignent l'importance du choix variétal pour maintenir un PMG élevé dans des conditions climatiques difficiles.

A l'ITGC, en 2020-21, BOS et OB présentaient le PMG le plus élevé (53,55 et 52,52 g, respectivement), suivis de GTA dur (46,31 g) avec un PMG moyen était de 50,79 g. En 2021-22, les poids de mille grains ont fortement baissé, avec des valeurs comprises entre 23,84 g et 26,52 g, tandis que l'effet du génotype était moins marqué. Le PMG a diminué de manière significative pour atteindre 24,88 g, soit une baisse de 51,01 %.

À Béni Fouda, en 2020-21, les génotypes BOS et OB présentaient les PMG les plus élevés, avec respectivement 48,74 g et 48,42 g, tandis que GTA dur affichait un PMG de 41,72g, pour une moyenne de 46,29 g. En 2021-22, une forte diminution du PMG a été observée, avec des valeurs variant entre 27,47 g et 31,53 g, traduisant une réduction moins marquée de l'effet du génotype. Le PMG moyen a significativement baissé pour atteindre 29,26 g, soit une réduction de 36,79 %.

Nos résultats sont similaires à ceux de Semcheddine (2020), qui a montré que certains génotypes, comme Boussellam, conservent un PMG élevé, les rendant ainsi mieux adaptés aux conditions semi-arides.

CHAPITRE II : COMPORTEMENT AGRO-MORPHO-PHYSIOLOGIQUE DE QUELQUES GENOTYPES DE BLE DUR SOUS CLIMAT SEMI-ARIDE.

L'analyse de variance ANOVA appliquée au PMG révèle que l'année est le facteur dominant, expliquant 88,56 % de la variabilité totale. Cela indique que les conditions climatiques annuelles influencent fortement le PMG. Les résultats de Benkadja et *al.*, (2022), confirment que la performance des génotypes varie en fonction de l'environnement, certains, comme Boussellam, se distinguant par un PMG élevé et stable face aux fluctuations climatiques en conditions semi-arides.

Cependant, des interactions significatives entre génotype x année ($p<0,01$) et site x année ($p<0,01$) désignant que la réponse du PMG varie d'une année à l'autre en fonction du génotype et du site, probablement en raison des différences climatiques. Ces résultats montrent que la variabilité du PMG est principalement déterminée par les conditions climatiques annuelles, avec un effet négligeable du génotype et du site, ce qui implique que la sélection variétale doit tenir compte des fluctuations interannuelles plutôt que des différences de site.

Dans les environnements contraignants, comme les zones semi-arides, la stabilité du PMG est un critère essentiel pour sélectionner des variétés adaptées aux conditions climatiques extrêmes (Ali et *al.*, 2021).

Bekaddour et *al.*, (2024) ont affirmé que le PMG est fortement affecté par les conditions climatiques, notamment le stress hydrique et thermique pendant la floraison et le remplissage du grain. Une compensation entre le poids de mille grains et le nombre de grains par épis peut être envisagée en cas de limitation des ressources en nutriments Afin de préserver un équilibre entre ces traits et maintenir un rendement optimal (Guendouz et *al.*, 2014).

4.3 Nombre d'épis par mètre carré (NEm^{-2})

Nombre d'épis par mètre carré est un indicateur clé du rendement, influencé par la densité de semis, la fertilité des talles et les conditions environnementales. Le tableau 7 présente les moyennes génotypiques des trois sites étudiés au cours des deux campagnes.

À Ain Oulmène, En 2020-21, le NEm^{-2} variait entre 255 épis pour BOS et 271,67 épis pour GTA dur, avec une moyenne générale de 265,89 épis. En 2021-22, une augmentation significative de 49,21 % a été observée, portant une moyenne de 396,76 épis. Le génotype GTA dur a atteint le nombre le plus élevé avec 500 épis, tandis que Boussellam et Oued El Bared sont classé secondairement avec respectivement 339,55 et 350,74 épis m^{-2} . L'augmentation de NEm^{-2} est probablement liée à des conditions climatiques favorables, notamment aux précipitations enregistrées en février, mars et avril, qui représentent 70,34 %, ainsi qu'à une

CHAPITRE II : COMPORTEMENT AGRO-MORPHO-PHYSIOLOGIQUE DE QUELQUES GENOTYPES DE BLE DUR SOUS CLIMAT SEMI-ARIDE.

meilleure exploitation des nutriments lors de la seconde saison cela est affirmé par l'effet dominant de l'année, expliquant environ 60,58 % de la variabilité, de plus, l'effet site et génotypes sont très hautement significatifs ($p<0,001$) (Tableau 6).

À l'ITGC, En 2020-21, la moyenne de NEm^{-2} était de 327,27 épis, avec une variation entre 278,33 épis pour GTA dur et 328 épis pour BOS, Oued El Bared a produit 279,33 épis qu'il a été statistiquement similaire avec GTA dur. En 2021-22, on observe une forte augmentation de 51,69 %, portant la moyenne à 496,44 épis. Le génotype GTA dur a montré la plus forte augmentation, atteignant 544,44 épis, tandis que BOS a atteint 444 épis. Cette augmentation pourrait être liée à une meilleure expression du tallage dans des conditions plus favorables.

Contrairement aux autres sites, Beni Fouda a présenté une hausse plus modérée du nombre d'épis par m^2 . En 2020-21, la moyenne était de 335,89 épis, variant entre 280,67 épis pour OB et 368,33 épis pour BOS. En 2021-22, une augmentation de 46,87 % a été enregistrée, portant la moyenne du site à 493,33 épis/ m^2 . Les génotypes OB et GTA dur ont affiché les valeurs les plus élevées avec 528,87 et 550,67 épis, respectivement, alors que BOS a atteint 400,44 épis.

D'après Djouadi et *al.*, (2021), une augmentation du nombre d'épis/ m^2 est un des leviers principaux pour améliorer le rendement en grains, les sélectionneurs visent des variétés combinant la capacité à produire un nombre optimal d'épis/ m^2 , haute fertilité des épis et une bonne tolérance aux stress climatiques. Les plantes exposées à un déficit hydrique sévère réduisent leur biomasse aérienne, ce qui entraîne moins de talles et une diminution du nombre d'épis (Boudjabi et *al.*, 2019). La sécheresse affecte négativement le nombre d'épis, réduisant la production de talles fertiles (Rabti et *al.*, 2020). Fellahi et *al.*, (2019), ont montré que la sélection des génotypes doit donc viser un compromis optimal entre les composantes de rendement pour assurer un rendement stable et performant.

4.4 Nombre des grains par épi (NGE^{-1})

À ITGC, en 2020-21, le NGE^{-1} variait entre 23 grains pour OB, GTA dur et 23,67 grains pour BOS sans différence significative entre les génotypes, une moyenne générale égale à 23,22 grains. En 2021-22, une augmentation significative de 38,76 % a été constatée, portant la moyenne à 32,08 grains (Tableau 7). Le génotype GTA dur a enregistré la valeur la plus élevée avec 34,67 grains, tandis que BOS et OB ont respectivement atteint 29,19 et 32,38 grains. L'augmentation du NGE^{-1} pourrait être attribuée aux conditions climatiques plus favorables de

CHAPITRE II : COMPORTEMENT AGRO-MORPHO-PHYSIOLOGIQUE DE QUELQUES GENOTYPES DE BLE DUR SOUS CLIMAT SEMI-ARIDE.

la seconde campagne, expliquant 17,20 % de la variabilité totale, ainsi qu'à une interaction positive entre les génotypes et l'année, confirmée par l'effet significatif du facteur Année ($p<0,001$) et l'interaction Site x Année ($p<0,01$) (Tableau 6).

À Ain Oulmène, en 2020-21, le NGE⁻¹ variait entre 26,67 grains pour GTA dur et 29 grains pour BOS, avec une moyenne générale de 28 grains. En 2021-22, une légère diminution de 3,18 % a été observée, avec une moyenne de 27,11 grains. Le génotype GTA dur a maintenu la valeur la plus élevée avec 27,68 grains, tandis que BOS et OB ont affiché des valeurs légèrement inférieures, respectivement 26,52 et 27,14 grains.

À Beni Fouda, en 2020-21, le NGE⁻¹ variait entre 27,33 grains pour OB et 33,67 grains pour BOS, avec une moyenne de 31 grains. En 2021-22, une augmentation de 18,16 % a été observée, avec une moyenne de 36,63 grains. Le génotype GTA dur a obtenu la valeur la plus élevée avec 38,52 grains, tandis que BOS et OB ont respectivement affiché 34,76 et 36,62 grains. Cette hausse est en accord avec l'effet significatif de l'année et du site, mettant en évidence l'influence de l'environnement sur les variations du NGE⁻¹.

Le stress hydrique entraîne une diminution marquée du nombre de grains par épis, principalement en raison d'une réduction du nombre de spikelets fertiles, la sécheresse durant la phase de différenciation des épillets limitant leur développement ; en conditions de stress sévère, certains génotypes testés ont même présenté des épis vides, confirmant ainsi son impact négatif sur la fertilité des épis (Hassen et al., 2024).

Le stress hydrique altère les processus de croissance des organes reproducteurs et réduit la formation finale des grains, affectant directement le nombre de grains par épis, un paramètre ayant un effet déterminant sur le rendement et constituant ainsi un critère clé pour la sélection variétale ; certains auteurs suggèrent d'ailleurs que l'optimisation de la morphologie de l'épi pourrait permettre de maximiser le rendement (Rabti et al., 2020).

4.5 Biomasse (Bio)

À ITGC, en 2020-21, la biomasse variait entre 53,74 q.h⁻¹ pour GTA dur et 83,98 q.h⁻¹ pour OB, avec une moyenne générale de 72,41 q.h⁻¹. En 2021-22, une augmentation significative de 59,70 % a été constatée, portant la moyenne à 115,64 q.h⁻¹ (Tableau 7). OB a enregistré la valeur la plus élevée avec 135,50 q.h⁻¹, suivi de GTA dur avec 118,25 q.h⁻¹, tandis que BOS a atteint 93,17 q.h⁻¹ sans différence entre les génotypes. Cette hausse pourrait être expliquée par des conditions environnementales du site, confirmée par l'effet significatif du

CHAPITRE II : COMPORTEMENT AGRO-MORPHO-PHYSIOLOGIQUE DE QUELQUES GENOTYPES DE BLE DUR SOUS CLIMAT SEMI-ARIDE.

facteur site ($p<0,05$) et de l'interaction Site x Année ($p<0,001$) (Tableau 6). Une biomasse élevée est généralement associée à un meilleur rendement sous conditions de stress. L'augmentation de la biomasse est un critère clé pour améliorer le potentiel de rendement en blé dur (Noura et al., 2021).

À AO, en 2020-21, la biomasse changeait entre $63,89 \text{ q.h}^{-1}$ pour GTA dur et $76,53 \text{ q.h}^{-1}$ pour BOS, sans différence significative entre les génotypes, avec une moyenne générale de $69,42 \text{ q.h}^{-1}$. En 2021-22, une augmentation de 14,72 % a été observée, portant la moyenne à $79,64 \text{ q.h}^{-1}$ (Tableau 7). Aucune différence génotypique a été remarquée, Le génotype OB a enregistré $81,66 \text{ q.h}^{-1}$, GTA avec $81,15 \text{ q.h}^{-1}$, tandis que BOS a atteint $76,12 \text{ q.h}^{-1}$. Donc, le comportement des génotypes dans ce site n'est pas stable et il varie de la première campagne à la second, l'environnementales spécifiques à chaque site a influencé différemment la biomasse selon l'année. Selon Aissaoui et Fenni, (2020), la biomasse accumulée a été influencée par la hauteur des plantes et la capacité à capter et utiliser l'eau efficacement.

À BF, en 2020-21, la biomasse variait entre $78,34 \text{ pour GTA dur et } 97,61 \text{ q.h}^{-1}$ pour OB, avec une moyenne générale de $88,27 \text{ q.h}^{-1}$. Contrairement aux autres sites, une baisse de 23,42 % a été enregistrée en 2021-22, portant la moyenne à $67,60 \text{ q.h}^{-1}$ (Tableau 7). OB a enregistré $74,26 \text{ q.h}^{-1}$, tandis que BOS et GTA dur ont respectivement atteint $63,44$ et $65,10 \text{ q.h}^{-1}$ sans effet génotypique remarquable.

L'instabilité des performances suggère qu'il serait utile d'identifier les facteurs environnementaux précis influençant la biomasse Afin d'adapter les pratiques culturales (irrigation, fertilisation). Le stress hydrique et thermique réduit la biomasse et affecte la capacité de la plante à transloquer les assimilats vers les grains (Ould Amer et al., 2023).

4.6 Indice de récolte (IR)

L'analyse de variance de l'indice de récolte révèle que le site est le facteur prédominant, expliquant 34,73 % de la variabilité totale, ce qui souligne l'impact majeur et très significatif des conditions environnementales locales sur ce paramètre ($p<0,001$) (Tableau 6). Le génotype contribue quant à lui à 7,79 % de la variabilité, indiquant une influence génétique significative ($p<0,05$) sur l'indice de récolte. Similaire aux résultats de Karkour et al, (2019), qu'ils ont révélé que l'indice de récolte varie significativement en fonction des génotypes et des conditions environnementales.

CHAPITRE II : COMPORTEMENT AGRO-MORPHO-PHYSIOLOGIQUE DE QUELQUES GENOTYPES DE BLE DUR SOUS CLIMAT SEMI-ARIDE.

À AO, en 2020-21, l'indice de récolte variait entre 36,06 % pour OB et 38,44 % pour BOS, avec une moyenne générale de 37,26 %. En 2021-22, une légère diminution de -2,92 % a été enregistrée, portant la moyenne à 36,17 %. L'absence de différence significative entre les génotypes suggère que l'effet du génotype sur l'IR est limité dans ce site (Tableau 7).

À l'ITGC, En 2020-21, l'indice de récolte changeait entre 32,45 % pour OB et 37,94 % pour GTA, avec une moyenne générale de 35,81 %. En 2021-22, une légère diminution non significative a été observée, les valeurs oscillant entre 31,12 % pour OB et 36,01 % pour GTA dur, avec une moyenne de 34,06.

À Beni Fouda, l'IR en 2020-21 était relativement élevé, avec une moyenne de 49,23 %, variant significativement entre 41,72 % pour OB et 55,53 % pour GTA dur. En 2021-22, une augmentation générale a été observée, atteignant 43,09 % pour OB et 60,92 % pour GTA dur, avec une moyenne de 51,39 %. Cette performance est due probablement à une adaptation plus efficace des génotypes aux conditions locales, favorisant une meilleure conversion de la biomasse en grains. Selon Haddad et *al*, (2021), les variétés à haut indice de récolte ont tendance à être plus précoces et plus courtes, ce qui favorise leur productivité dans des environnements améliorés. Belagrouz et *al*, (2018) montrent que les variétés à haut indice de récolte sont privilégiées, car elles permettent d'obtenir un bon rendement même en conditions de stress hydrique. La sélection pour un indice de récolte élevé constitue une stratégie d'amélioration génétique visant à optimiser la productivité du blé dur en climat méditerranéen (Guendouz et *al.*, 2013). Les études de Bousalhih et *al*, (2016), suggèrent que les croisements entre ces variétés modernes et locales pourraient permettre d'obtenir des hybrides combinant un indice de récolte élevé avec une meilleure tolérance au stress.

CHAPITRE II : COMPORTEMENT AGRO-MORPHO-PHYSIOLOGIQUE DE QUELQUES GENOTYPES DE BLE DUR SOUS CLIMAT SEMI-ARIDE.

Tableau 7: Comparaison des moyennes des variables agronomiques sur deux saisons et trois sites.

Paramètres		RDT		PMG		NEm ⁻²		NGE ⁻¹		BIO		IR	
Site		AO											
Génotypes	Saisons	20-21	21-22	20-21	21-22	20-21	21-22	20-21	21-22	20-21	21-22	20-21	21-22
BOS AO		26,09 ^a	24,61 ^b	52,08 ^a	26,40 ^a	255 ^b	339,55 ^b	29 ^a	26,52 ^a	76,53 ^a	76,12 ^a	38,44 ^a	36,81 ^a
OB AO		22,91 ^b	25,25 ^b	48,14 ^b	26,90 ^a	271 ^a	350,74 ^b	28,33 ^a	27,14 ^a	67,84 ^a	81,66 ^a	36,06 ^a	33,84 ^a
GTA AO		23,14 ^b	28,70 ^a	51,32 ^a	27,53 ^a	271,67 ^a	500 ^a	26,67 ^b	27,68 ^a	63,89 ^a	81,15 ^a	37,28 ^a	37,86 ^a
Moyenne		24,05	26,19	50,51	26,94	265,89	396,76	28	27,11	69,42	79,64	37,26	36,17
LSD 5%		2,27	3,09	2,03	6,80	15,56	88,97	0,92	10,95	24,04	21,80	18,23	14,67
CV %		4,17	5,20	1,78	11,13	2,58	9,90	1,45	17,81	15,27	4,57	21,59	17,89
Taux diff %		+8.90		-46.66		+49.21		-3.18		+14.72		-2.92	
Paramètres		RDT		PMG		NEm ⁻²		NGE ⁻¹		BIO		IR	
Site		ITGC											
Génotypes	Saisons	20-21	21-22	20-21	21-22	20-21	21-22	20-21	21-22	20-21	21-22	20-21	21-22
BOS ITGC		26,77 ^a	28,11 ^b	53,55 ^a	23,84 ^a	328 ^a	444,00 ^a	23,67 ^a	29,19 ^a	79,51 ^a	93,17 ^a	37,04 ^a	35,06 ^a
OB ITGC		25,97 ^a	39,21 ^{ab}	52,52 ^a	24,29 ^a	279,33 ^b	500,89 ^a	23 ^a	32,38 ^a	83,98 ^a	135,50 ^a	32,45 ^a	31,12 ^a
GTA ITGC		19,56 ^b	40,14 ^a	46,31 ^b	26,52 ^a	278,33 ^b	544,44 ^a	23 ^a	34,67 ^a	53,74 ^b	118,25 ^a	37,94 ^a	36,01 ^a
Moyenne		24,10	35,82	50,79	24,88	327,27	496,44	23,22	32,08	72,41	115,64	35,81	34,06
LSD 5%		3,48	11,14	4,88	7,37	41,01	115,78	10,57	7,48	22,70	61,26	11,95	13,12
CV %		6,37	13,72	4,24	13,07	6,12	10,28	20,09	10,29	13,82	23,37	14,72	16,98
Taux diff %		+48,63		-51,01		+51,69		+38,76		+59,70		-4,89	
Paramètres		RDT		PMG		NEm ⁻²		NGE ⁻¹		BIO		IR	
Site		BF											
Génotypes	Saisons	20-21	21-22	20-21	21-22	20-21	21-22	20-21	21-22	20-21	21-22	20-21	21-22
BOS BF		44,69 ^a	31,63 ^b	48,74 ^a	27,47 ^a	368,33 ^a	400,44 ^b	33,67 ^a	34,76 ^a	88,87 ^b	63,44 ^a	50,42 ^b	50,16 ^{ab}
OB BF		40,72 ^b	31,98 ^b	48,42 ^a	28,79 ^a	280,67 ^b	528,87 ^a	27,33 ^b	36,62 ^a	97,61 ^a	74,26 ^a	41,72 ^c	43,09 ^b
GTA BF		43,44 ^{ab}	39,36 ^a	41,72 ^b	31,53 ^a	358,67 ^a	550,67 ^a	32 ^a	38,52 ^a	78,34 ^c	65,10 ^a	55,53 ^a	60,92 ^a
Moyenne		42,95	34,32	46,29	29,26	335,89	493,33	31	36,63	88,27	67,60	49,23	51,39
LSD 5%		2,78	5,48	4,50	10,81	53,88	31,72	2,92	7,86	5,80	19,28	3,98	11,38
CV %		2,86	7,04	4,30	16,29	7,07	2,84	4,16	9,46	2,90	12,58	3,57	9,76
Taux diff %		-20,09		-36,79		+46,87		+18,16		-23,42		+4,39	

RDT : Rendement en grain, PMG : Poids ce 1000 grains, NEm⁻² : Nombre épis par mètre carré, NGE⁻¹ : Nombre grains par épis, Bio : Biomasse,

IR : Indice de récolte, ns : non significatif, * : significatif à 0,05, ** : significatif à 0,01, *** : significatif à 0,001.

CHAPITRE II : COMPORTEMENT AGRO-MORPHO-PHYSIOLOGIQUE DE QUELQUES GENOTYPES DE BLE DUR SOUS CLIMAT SEMI-ARIDE.

5. Classement des génotypes selon les paramètres agronomiques

Le tableau 8 présente le classement des génotypes en fonction de plusieurs variables agronomiques, basé sur les résultats de comparaison des moyenne LSD. L'évaluation révèle que GTA dur s'est classé en première position à Ain Oulmène et à Beni Fouda, suivi de Boussellam et puis Oued El Bared. À l'ITGC, Boussellam a montré les meilleures performances, suivi de Oued El Bared. Globalement, dans des conditions locales semi-arides, le classement final indique que Boussellam présente la meilleure performance agronomique, suivi de GTA dur, tandis que Oued El Bared affiche des performances relativement faibles. Ces résultats soulignent l'importance de l'adaptation des génotypes aux conditions agro-climatiques spécifiques.

Tableau 8: Classement des génotypes selon les paramètres agronomiques lors des deux saisons.

Génotypes	Variables	RDT	PMG	NEm ⁻²	NGE ⁻¹	BIO	IR	Score	Classement
BOS AO		1,5	1	2	1	1	1	7,5	2
OB AO		2	1,5	1,5	1	1	1	8	3
GTA AO		1,5	1	1	1,5	1	1	7	1
BOS ITGC		1,5	1	1	1	1	1	6,5	1
OB ITGC		1,25	1	1,5	1	1	1	6,75	2
GTA ITGC		1,5	1,5	1,5	1	1,5	1	8	3
BOS BF		1,5	1	1,5	1	1,5	1,75	8,25	2
OB BF		2	1	1,5	1,5	1	2,5	9,5	3
GTA BF		1,25	1,5	1	1	2	1	7,75	1
BOS	Classement final							7,41	1
OB								8,08	3
GTA								7,58	2

RDT : Rendement en grain, PMG : Poids ce 1000 grains, NEm⁻² : Nombre épis par mètre carré, NGE⁻¹ : Nombre grains par épi, Bio : Biomasse, IR : Indice de récolte.

6. Analyse des corrélations entre l'ensemble des paramètres étudiés

6.1 Analyse de corrélation simple

Le tableau 9 montre les résultats de corrélation des différents paramètres phéno-physio-morphologique et agronomiques lors des deux saisons de culture. En 2020-21, la teneur relative en eau (TRE) a présenté des corrélations négatives et significatives avec la température du couvert végétal (TC) ($r = -0,43^*$) et le nombre de jours à l'épiaison (NJE) ($r = -0,59^{**}$) en accord avec les résultats de El Idrissi et al. (2023) et de Boudersa et al. (2021). En revanche, elle était positivement corrélée au rendement en grain (RDT) et au nombre d'épis par mètre carré (NEm⁻²) (El-Hendawy et al., 2019 ;Wasaya et al., 2021), avec des coefficients de corrélation de $r = 0,44^*$ dans les deux cas, ces résultats montrent que la TRE est un indicateur clé de la tolérance

CHAPITRE II : COMPORTEMENT AGRO-MORPHO-PHYSIOLOGIQUE DE QUELQUES GENOTYPES DE BLE DUR SOUS CLIMAT SEMI-ARIDE.

à la sécheresse et de la performance agronomique. Une TRE élevée est associée à une température plus basse du couvert végétal (TC), indiquant un effet de refroidissement par transpiration, et à un cycle végétatif plus court (NJE faible), suggérant que les variétés précoces conservent mieux leur eau. De plus, la TRE est positivement corrélée au RDT et au NEm⁻², ce qui souligne l'importance d'une bonne gestion de l'eau pour assurer une production optimale. Ces corrélations confirment que les variétés capables de maintenir une haute TRE sont mieux adaptées aux conditions de stress hydrique et offrent un meilleur potentiel de rendement. La corrélation positive entre la perte en eau des feuilles (LWL) et la TRE ($r=0,57^{**}$) suggère que sous stress hydrique, la TRE et LWL diminuent, reflétant une réduction de l'hydratation des tissus et une régulation stomatique limitant les pertes en eau pour préserver l'équilibre hydrique de la plante (Vardharajula et al., 2011). Par ailleurs, la corrélation positive entre LWL et la fuite d'électrolytes (FE) ($r=0,64^{***}$) indique que des pertes en eau importantes sont associées à une détérioration de l'intégrité membranaire des cellules foliaires, traduisant un stress physiologique (Khan et al., 2016).

Des corrélations négatives ont été observées entre la température du couvert végétal et plusieurs paramètres morpho-agronomiques et physiologiques 2020-21, notamment, la surface foliaire ($r=-0,61^{***}$), la hauteur de la plante ($r=-0,75^{***}$), le rendement en grain ($r_{20-21}=-0,93^{***}$; $r_{21-22}=-0,52^{**}$), la biomasse ($r=-0,42^*$), l'indice de récolte ($r=-0,57^{**}$), le nombre de grains par épis ($r=-0,66^{***}$), le nombre d'épis par m² ($r=-0,67^{***}$) et le taux de chlorophylle en 2021-22 ($r=-0,54^{**}$), ces résultats s'accorde avec El Idrissi et al., (2023) ; Mansouri et al., (2018), une température élevée du couvert végétal est un symptôme de stress thermique et hydrique, affectant négativement la croissance, la photosynthèse et la production de grains. Cette relation négative indique l'importance de sélectionner des variétés capables de maintenir une bonne transpiration et une température de couvert plus basse, notamment en conditions de sécheresse.

En 2020-21, Le nombre de jours à l'épiaison (NJE) présente une corrélation négative avec la surface foliaire ($r=-0,49^*$), la hauteur de la plante ($r=-0,58^{**}$), le rendement en grain ($r=-0,81^{***}$), la biomasse ($r=-0,46^*$), l'indice de récolte ($r=-0,42^*$), le nombre de grains par épis ($r=-0,46^*$), le nombre d'épis m⁻² ($r=-0,66^{***}$) et avec le poids spécifique foliaire (PSF) en 2021-22 ($r=-0,46^*$). Un NJE élevé est un indicateur de floraison tardive, souvent associé à une croissance végétative réduite et un rendement moindre. Cela montre l'avantage des variétés précoces qui évitent les périodes de stress en assurant un meilleur développement foliaire, une biomasse plus importante et une production granière optimisée (Karkour et al., 2019 ; Lamara

CHAPITRE II : COMPORTEMENT AGRO-MORPHO-PHYSIOLOGIQUE DE QUELQUES GENOTYPES DE BLE DUR SOUS CLIMAT SEMI-ARIDE.

et *al.*, 2022).

Des corrélations positives en 2020-21 entre la hauteur de la plante (HP) avec Surface foliaire, l'indice de récolte, le nombre des grains épi⁻¹, nombre d'épi m⁻² et le rendement en grain avec respectivement ($r= 0,77^{**}$, $r= 0,44^*$, $r= 0,57^{**}$, $r= 0,50^{**}$, $r= 0,79^{***}$), ces résultats sont en accord avec ceux de Benalia, (2024) ; Boulelouah et al, (2022). Tandis que en 2021-22 des corrélation négative entre HP avec rendement en grain (RDT), IR, PMG, NGE⁻¹, NEm⁻² et PSF avec ($r= -0,42^*$, $r= -0,51^{**}$, $r= -0,52^{**}$, $r= -0,51^{**}$, $r= -0,46^*$ et $r= -0,48^*$, respectivement). (Guendouz et *al.*, 2014 ; Gao et *al.*, 2020; Jaisi et *al.*, 2021).

Des corrélations positives et significatives entre le rendement en grains et ses composantes de rendement, le rendement en grain est corrélé avec la Biomasse ($r_{20-21}= 0,46^*$, $r_{21-22}= 0,56^{**}$), IR ($r_{20-21}= 0,57^{**}$), PMG ($r_{21-22}= 0,42^*$), NGE⁻¹ ($r_{20-21}= 0,62^{**}$, $r_{21-22}= 0,50^{**}$), NEm⁻² ($r_{20-21}= 0,70^{**}$, $r_{21-22}= 0,65^{**}$), Ces résultats indiquent que ces corrélations soulignent l'influence de ces paramètres sur la variation du rendement, sans pour autant prouver qu'une amélioration directe de chacun d'eux entraînera systématiquement une augmentation du rendement (Geyer et *al.*, 2022 ; Lama et *al.*, 2023 ; Mohiy et El-Moselhy, 2022).

CHAPITRE II : COMPORTEMENT AGRO-MORPHO-PHYSIOLOGIQUE DE QUELQUES GENOTYPES DE BLE DUR SOUS CLIMAT SEMI-ARIDE.

Tableau 9: Corrélations entre les variables étudiées au cours des campagnes agricoles.

21-22 20-21	CLH	TRE	LWL	FE	TC	NJE	SF	PSF	HP	RDT	BIO	IR	PMG	NGE	NEm2
CHL	1	0,38*	0,22	0,16	-0,54**	-0,35	-0,13	0,36	-0,32	0,40*	0,10	0,14	-0,05	0,45*	0,31
TRE	0,13	1	0,57**	- 0,27	-0,27	0,34	0,29	-0,12	0,07	0,34	0,27	-0,12	-0,04	0,28	0,00
LWL	- 0,07	-0,20	1	- 0,11	-0,19	-0,08	0,64***	-0,21	0,04	0,31	0,22	0,01	-0,4*	0,12	0,22
FE	- 0,19	-0,36	0,64***	1	-0,24	-0,43*	-0,18	0,37	-0,36	0,09	-0,19	0,34	0,08	0,22	0,10
TC	0,17	-0,43*	0,01	0,05	1	0,32	0,25	-0,33	0,23	-0,52**	-0,31	0,00	-0,01	-0,33	-0,28
NJE	0,22	- 0,59**	0,14	0,12	0,80***	1	0,13	-0,46*	0,45*	-0,03	0,16	-0,28	0,01	-0,32	-0,04
SF	0,06	0,22	0,38	0,32	- 0,61***	-0,49**	1	- 0,53**	0,28	-0,08	-0,10	0,17	-0,31	-0,14	-0,11
PSF	0,20	-0,04	0,22	- 0,00	0,14	0,21	-0,33	1	-0,48*	0,07	-0,32	0,37	0,13	0,52**	0,28
HP	0,23	0,34	0,23	0,15	- 0,75***	-0,58**	0,77***	-0,17	1	-0,42*	0,20	-0,51**	- 0,52**	- 0,51**	-0,46*
RDT	0,01	0,44*	-0,19	- 0,09	- 0,93***	- 0,81***	0,58**	-0,17	0,79***	1	0,56**	0,09	0,42*	0,50**	0,65***
BIO	0,20	0,24	-0,18	- 0,33	-0,42*	-0,46*	0,32	-0,02	0,34	0,46*	1	- 0,78***	0,14	-0,12	0,24
IR	- 0,27	0,19	-0,05	0,22	-0,57**	-0,42*	0,27	-0,17	0,44*	0,57**	-0,43*	1	0,07	0,48*	0,15
PMG	- 0,24	-0,07	0,16	- 0,15	0,26	0,08	-0,29	0,21	-0,34	-0,37	0,04	-0,34	1	0,36	0,11
NGE	- 0,14	0,01	0,35	0,34	- 0,66***	-0,46*	0,54**	0,05	0,57**	0,62***	0,13	0,49**	-0,35	1	0,32
NEm2	- 0,20	0,44*	-0,27	- 0,21	- 0,67***	- 0,66***	0,22	-0,24	0,50**	0,70***	0,19	0,51**	-0,31	0,35	1

CLH : Teneur en chlorophylle, TRE : Teneur relative en eau, LWL : Vitesse de perte d'eau, FE : Fuite d'électrolytes, TC : Température du couvert végétale, NJE : nombre de jours à l'épiaison, SF : Surface foliaire, PSF : Poids spécifique foliaire, HP : Hauteur de la plante, RDT : Rendement en grain, PMG : Poids ce 1000 grains, NEm² : Nombre épis par mètre carré, NGE⁻¹ : Nombre grains par épi, Bio : Biomasse, IR : Indice de récolte, ns : non significatif, * : significatif à 0,05, ** : significatif à 0,01, *** : significatif à 0,001.

CHAPITRE II : COMPORTEMENT AGRO-PHYSIOLOGIQUE DE QUELQUES GENOTYPES DE BLE DUR SOUS CLIMAT SEMI-ARIDE

6.2 Analyse en Composant Principale (ACP)

L'analyse en Composantes Principales est une méthode statistique multivarié, Elle est couramment utilisée en sélection variétale pour identifier les traits les plus discriminants entre les génotypes (Allam et al., 2022 ; Tissaoui et al., 2022).

L'analyse en composantes principales (ACP) réalisée pour l'année 2020-21 révèle une forte structuration des données en trois dimensions principales d'une variabilité de 76,8 % (Figure 11). La première composante explique 47 % de la variance totale, étant fortement associée aux majorités des variables RDT, NEm⁻², NGE⁻¹, HP, BIO et IR, qui caractérisent principalement les génotypes BOS BF, GTA BF et OB BF. Ces génotypes se démarquent par leurs performances élevées. La deuxième composante, qui représente 18,5 % de la variance, est positivement corrélée avec les variables FE et LWL. Elle est négativement associée aux génotypes BOS ITGC et OB ITGC, tandis qu'elle est positivement liée à ceux d'Ain Oulmène. La troisième composante, qui explique 11,3 % de la variance, est principalement associée aux variables PMG et PSF. Elle se caractérise par une corrélation positive avec BOS AO et négative avec GTA BF, bien que son influence sur la structuration globale des données soit relativement faible (Figure 10).

Ces résultats sont en accord avec ceux de l'analyse de corrélation, qui ont révélé que le nombre d'épis, la biomasse et l'indice de récolte sont les principaux caractères associés et prédictifs du rendement en grain, comme rapporté par Mansouri et al, (2018).

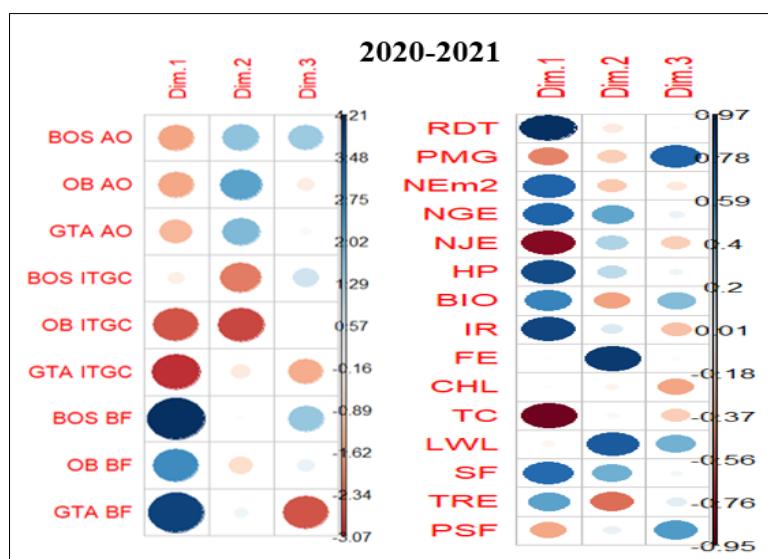


Figure 11: Visualisation des relations des variables et des génotypes selon les trois premières composantes de l'ACP (2020-21).

CHAPITRE II : COMPORTEMENT AGRO-PHYSIOLOGIQUE DE QUELQUES GENOTYPES DE BLE DUR SOUS CLIMAT SEMI-ARIDE

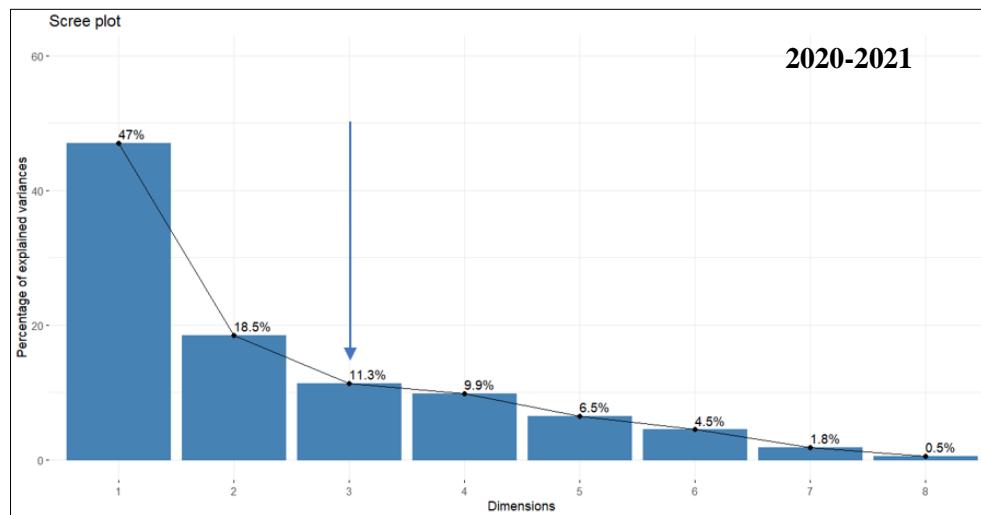


Figure 12: Pourcentage de variance expliquée par dimension dans l'ACP (2020–21)

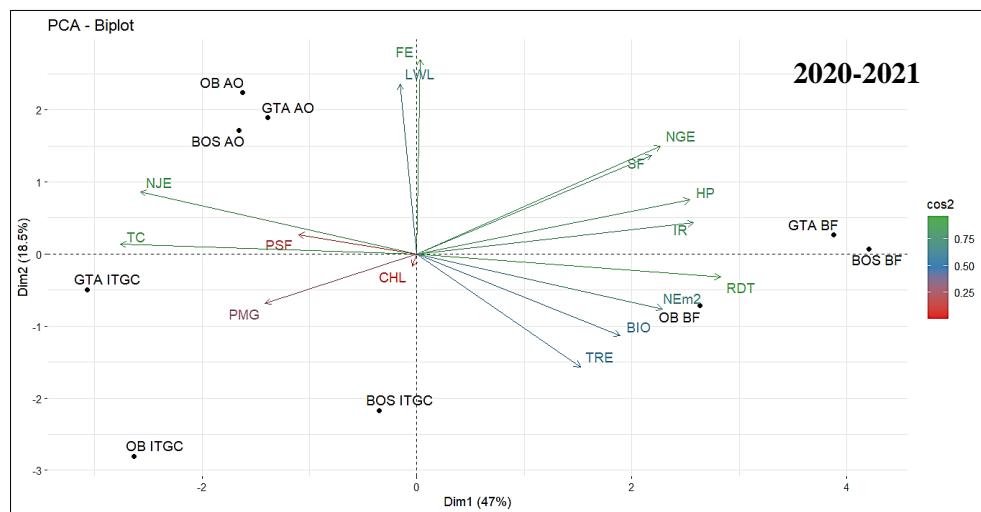


Figure 13: Représentation des génotypes et des variables sur les trois premières composantes principales de l'ACP en 2020-21.

En 2021-22, les résultats des Figures 13 et 14 indiquent que les trois premières composantes principales expliquent 82,3 % de la variabilité totale. La première composante (PC1), qui représente 40,8 % de la variance, est fortement associée aux variables NEm^{-2} , HP, IR, FE et PSF. Ces variables caractérisent positivement les génotypes BOS BF, OB BF et GTA BF, tandis qu'elles sont négativement associées aux génotypes d'Ain Oulmène. La deuxième composante (PC2), expliquant 28,7 % de la variance, est principalement corrélée avec OB ITGC et GTA ITGC, qui se distinguent par des valeurs élevées de RDT, BIO, LWL et TRE. Enfin, la troisième composante (PC3), bien qu'expliquant une part plus faible de la variance, est positivement corrélée avec GTA BF et négativement avec BOS ITGC, en lien avec les variables PMG, NJE et TC (Figure 15). En conséquence, bien que les mêmes génotypes aient été semés dans trois

CHAPITRE II : COMPORTEMENT AGRO-PHYSIOLOGIQUE DE QUELQUES GENOTYPES DE BLE DUR SOUS CLIMAT SEMI-ARIDE

régions, leurs comportements ont varié significativement. Ils se sont révélés plus productifs et vigoureux à Beni Fouda, moins performants à l'ITGC et ont montré un faible potentiel à Ain Oulmène. Ces résultats confirment l'influence des conditions climatiques et de l'effet du site sur la performance des génotypes. Ils offrent ainsi des indications précieuses aux sélectionneurs pour réduire ces variations et fluctuations, en vue de développer des génotypes plus stables et mieux adaptés aux conditions semi-arides, notamment dans les hauts plateaux.

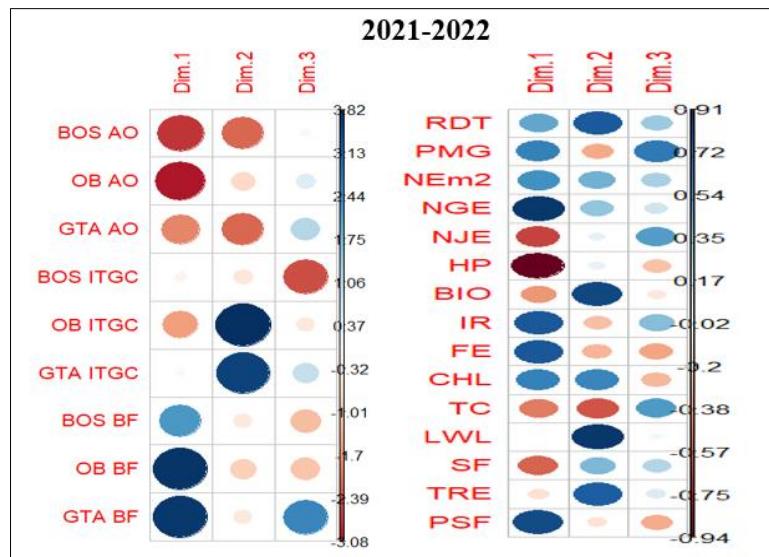


Figure 14: Visualisation des relations des variables et des génotypes selon les trois premières composantes de l'ACP (2021-22).

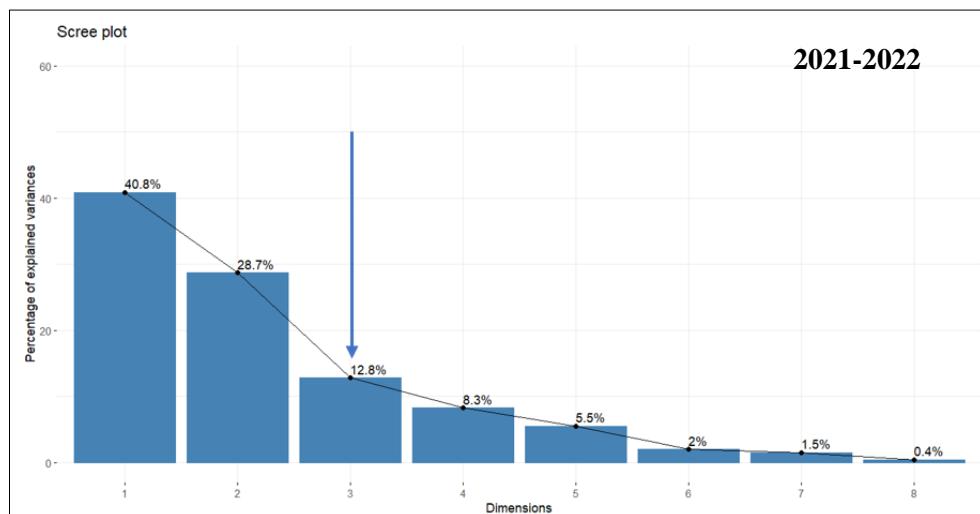


Figure 15: Graphique montrant la variance expliquée en fonction des composantes principales 2021-22.

CHAPITRE II : COMPORTEMENT AGRO-PHYSIOLOGIQUE DE QUELQUES GENOTYPES DE BLE DUR SOUS CLIMAT SEMI-ARIDE

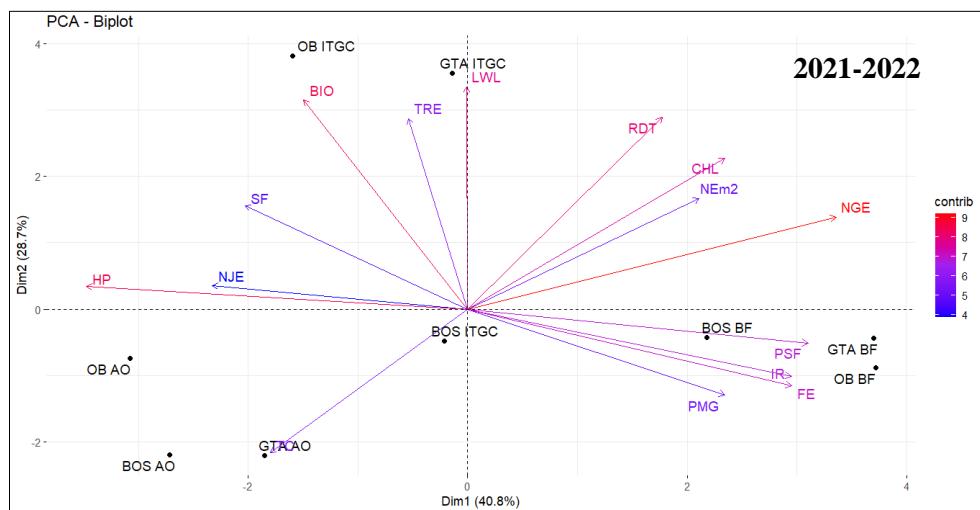


Figure 16: Représentation des génotypes et des variables sur les trois premières composantes principales de l'ACP en 2021-22.

6.3 Analyse de régression linéaire multiple

Les résultats de la régression linéaire multiple montrent que la biomasse (BIO) et l'indice de récolte (IR) sont les principaux facteurs influençant significativement le rendement en grains de blé dur au cours des deux saisons étudiées ($p<0,001$) (Tableau 10). Ces deux paramètres expliquent une grande partie de la variabilité du rendement, avec des coefficients de détermination élevés ($R^2 = 0,9824$ en 2020-21 et $R^2 = 0,892$ en 2021-22). En revanche, l'effet de la hauteur de la plante (HP) est variable : positif et significatif en 2020-21 ($p<0,05$), mais négatif et non significatif en 2021-22. De même, le poids de mille grains (PMG) influence négativement le rendement en 2020-21 ($p<0,05$), tandis que son effet devient négligeable l'année suivante. Par ailleurs, le nombre de grains par épis (NGE) montre une tendance positive en 2021-22, bien que sa significativité reste marginale ($p= 0,06$). En revanche, le nombre d'épis par mètre carré (NEm²) et le nombre de jours à l'épiaison (NJE) n'ont pas d'effet significative sur le rendement. Ces résultats suggèrent que, bien que certains traits comme la biomasse et l'indice de récolte soient des déterminants majeurs du rendement, l'effet des autres composantes varie en fonction des conditions environnementales propres à chaque saison. Par conséquent, sur la base de l'analyse de la régression multiple, l'équation de prédiction du rendement en grains (RDT) est formulée comme suit :

2020-21 :

$$\text{RDT} = -30,84 - 0,18 \text{ PMG} + 0,01 \text{ NGE} + 0,01 \text{ NEm}^{-2} + 0,02 \text{ NJE} + 0,09 \text{ HP} + 0,38 \text{ BIO} + 0,67 \text{ IR}$$

2021-22 :

$$\text{RDT} = -25,85 - 0,005 \text{ PMG} + 0,24 \text{ NGE} + 0,007 \text{ NEm}^{-2} + 0,16 \text{ NJE} - 0,14 \text{ HP} + 0,21 \text{ BIO} + 0,39 \text{ IR}$$

Ces modèles expliquent plus de 97 % des variations du rendement en grains, tandis qu’inférieur à 2,4 % restants pourraient être attribués à des effets résiduels. Le test t a révélé que la Biomasse, l’indice de récolte, la hauteur de la plante et le PMG en 2020-21 contribuent significativement au rendement. Ces résultats sont cohérents avec ceux de Tang et al, (2022) ; Yue et al, (2021), qui ont démontré l’importance de la biomasse et du PMG dans la production de blé.

Tableau 10: Coefficients de régression (*b*), valeur *t* et probabilité (*P*) des variables estimées pour la prédiction du rendement en grains par régression linéaire multiple.

Coefficients	<i>Coefficient estimé (b)</i>		<i>t de Student</i>		<i>Probabilité (p)</i>	
Saison	20-21	21-22	20-21	21-22	20-21	21-22
(Intercept)	-30,84	-25,85	-1,45	-1,71	0,16	0,10
PMG	-0,18	-0,00	-2,13	-0,03	0,04*	0,97
NGE	0,01	0,24	0,18	1,98	0,85	0,06.
NEm ⁻²	0,01	0,00	1,20	0,76	0,24	0,45
NJE	0,02	0,16	0,20	1,52	0,84	0,14
HP	0,09	-0,14	2,41	-1,49	0,02*	0,15
BIO	0,38	0,21	11,47	6,62	0,000***	0,000 ***
IR	0,67	0,39	11,00	3,90	0,000***	0,000***

* : $p < 0,05$, ** : $p < 0,01$, *** : $p < 0,001$. R^2 : 0,9824, R^2 ajusté : 0,9759 (2020-21), R^2 : 0,892, R^2 ajusté: 0,8521 (2021-22)

6.4 Analyse de régression par étapes « pas à pas » (Stepwise Analysis)

Le tableau 11 présente les résultats de la régression par étapes pour la prédiction du rendement en grains de blé dur. Cette méthode a permis d’éliminer les variables ayant une faible contribution à la variation du rendement, ne conservant que les plus influentes. Les résultats indiquent que la biomasse (BIO) et l’indice de récolte (IR) ont contribué de manière très hautement significative au rendement ($p < 0,001$), confirmant leur importance de prédiction. La hauteur de plante (HP) a montré un effet variable selon les années, avec une contribution significative en 2020-21 ($p < 0,05$) mais une corrélation négative en 2021-22. D’autres variables, comme le poids de mille grains (PMG) et le nombre de grains par épis (NGE), ont été exclues du modèle pour certaines années en raison de leur faible impact relatif. Le modèle final présente un coefficient de détermination élevé ($R^2 = 0,981$ en 2020-21 et $R^2 = 0,8876$ en 2021-22), indiquant qu’il explique la majorité de la variabilité du rendement. Ces résultats corroborent les études antérieures, notamment celles de Abderrahmane et al, (2013), qui ont montré que le

CHAPITRE II : COMPORTEMENT AGRO-PHYSIOLOGIQUE DE QUELQUES GENOTYPES DE BLE DUR SOUS CLIMAT SEMI-ARIDE

nombre de grains par épi, le poids de mille grains (PMG) la biomasse et l'indice de récolte ont été intégrés dans le modèle de régression par étapes, expliquant 88-98 % de la variance du rendement en grains.

2020-21 : RDT= -24,61- 0,20 PMG + 0,10 HP + 0,39 BIO + 0,70 IR

2021-22 : RDT= -25,76 + 0,24 NGE + 0,18 NJE – 0,16 HP + 0,22 BIO + 0,70 IR

Tableau 11: Prédiction du rendement en grains par l'analyse de régression par étapes.

Coefficients	<i>Coefficient estimé (b)</i>	<i>t de Student</i>	<i>Probabilité (p)</i>
Saison	20-21	21-22	20-21
(Intercept)	-24,61	-25,76	-5,00
PMG	-0,20	Sortie	-2,66
NGE	Sortie	0,24	Sortie
NJE	Sortie	0,18	Sortie
HP	0,10	-0,16	2,61
BIO	0,39	0,22	18,29
IR	0,70	0,42	18,32

* : $p < 0,05$, ** : $p < 0,01$, *** : $p < 0,001$, R^2 : 0,981, R^2 ajusté: 0,9776 (2020-21); R^2 : 0,8876, R^2 ajusté : 0,8608 (2021-22)

6.5 Analyse de Chemin (Path Analysis)

Les coefficients de chemin (Path coefficients) ont été calculés pour estimer la contribution des caractères individuels au rendement en grain (RDT). L'analyse du coefficient de chemin utilisant le rendement en grain comme variable dépendante et les autres variables comme variables indépendantes est présentée dans le tableau 12, La représentation schématique des effets des variables sur le rendement est illustrée dans la Figure 16.

Les résultats montrent que pour la période 2020-21, La biomasse (BIO) et l'indice de récolte (IR) ont eu les effets les plus positifs et très hautement significatifs sur le rendement en grain ($p < 0,001$), avec des coefficients standardisés de +0,775 et +0,811, respectivement. En revanche, le poids de mille grains (PMG) et la hauteur des plantes (HP) ont eu un effet significatif au seuil de 0,05 et 0,01, respectivement, avec un effet direct négatif du PMG (-0,077) et un effet positif de HP (+0,114).

En 2021-22, les résultats montrent une tendance similaire, avec BIO (+1,157) et IR (+0,725) ayant les plus grands effets positifs sur le rendement en grain, confirmant leur rôle déterminant dans l'augmentation de la productivité. À l'inverse, HP présente cette fois un effet négatif (-0,218), ce qui pourrait indiquer des variations environnementales affectant son

CHAPITRE II : COMPORTEMENT AGRO-PHYSIOLOGIQUE DE QUELQUES GENOTYPES DE BLE DUR SOUS CLIMAT SEMI-ARIDE

influence sur le rendement. Cependant le NGE possède un effet positif et très significatif sur le rendement en grain avec 0,208.

Nos résultats sont cohérents avec des études antérieures (Ali, 2012 ; Astereki et al., 2017 ; Zewdu et al., 2024), qu'ils ont montré que la biomasse et l'indice de récolte sont les principales sources influençant la variation du rendement en grain dans les régions semi-arides. Par conséquent, ces critères peuvent être considérés comme des indicateurs efficaces pour la sélection en vue de l'amélioration du rendement en grain du blé dur.

Tableau 12: Effets directs standardisés des variables explicatives sur le rendement en grain.

Variables	Valeur p	Coefficient standardisé	Valeur p	Coefficient standardisé
2020-21			2021-22	
PMG	0,011	-0,077	0,972	-0,003
NGE	0,828	0,008	0,018	0,208
NEm⁻²	0,152	0,055	0,360	0,088
NJE	0,812	0,012	0,070	0,150
HP	0,004	0,114	0,076	-0,218
BIO	0,000	0,775	0,000	1,157
IR	0,000	0,811	0,000	0,725

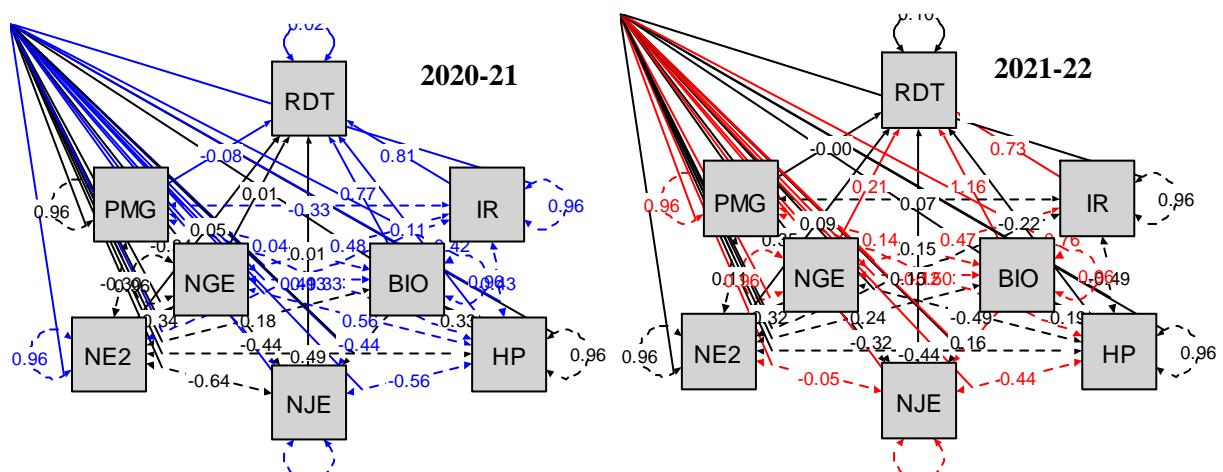


Figure 17: Effet direct et indirect des variables sur le rendement en grain.

6.6 Analyse Factorielle

L'analyse a permis d'identifier trois facteurs principaux qui expliquent ensemble une grande partie de la variance totale des données.

CHAPITRE II : COMPORTEMENT AGRO-PHYSIOLOGIQUE DE QUELQUES GENOTYPES DE BLE DUR SOUS CLIMAT SEMI-ARIDE

Tableau 13: Analyse factorielle des huit caractères agronomiques en 2020-21

2020-21				
Variables	Facteur 1	Facteur 2	Facteur 3	Communalité (0-1)
RDT	0,918	0,155	0,357	0,995
PMG	-0,163	0,098	-0,674	0,491
NEm⁻²	0,655	-0,035	0,267	0,501
NGE	0,553	-0,061	0,351	0,433
NJE	-0,844	-0,175	-0,009	0,743
HP	0,644	0,131	0,490	0,672
BIO	0,355	0,932	-0,014	0,995
IR	0,656	-0,710	0,242	0,994
Valeurs propres	3,288	1,459	1,075	5,822
Proportion de la variance	0,411	0,182	0,134	
Cumule de la variance %	41,1	59,3	72,7	

Tableau 14: Résumé des coefficients de saturation des facteurs pour les huit caractères étudiés 2020-21

2020-21			
Variables	Valeurs propres	% Cumule variance	Facteur retenu
Facteur 1	3,288	41,1	NEm⁻² NJE
RDT	0,918		
NEm⁻²	0,655		
NGE	0,553		
NJE	-0,844		
HP	0,644		
Facteur 2	1,459	18,2	BIO
BIO	0,932		
IR	-0,710		
Facteur 3	1,075	13,4	PMG
PMG	-0,674		

En 2020-21, les tableaux 13 et 14 présentent l'analyse factorielle. Le premier facteur, avec une valeur propre de 3,288, explique 41,1 % de la variance totale. Il est principalement associé à RDT, NEm⁻² et NJE, indiquant un effet direct de ces caractères sur le rendement. Le deuxième facteur, avec une valeur propre de 1,459, représente 18,2 % de la variance et regroupe BIO, tandis que le troisième facteur (1,075, soit 13,4 %) est dominé par PMG. Ces variables affectent indirectement le RDT, suggérant une interaction complexe entre ces variables agronomiques et le rendement.

En 2021-22, l'analyse factorielle des tableaux 15 et 16 montre que NEm⁻² (facteur 1) explique 26,6 % de la variance, influençant directement le rendement, tandis que BIO, IR

CHAPITRE II : COMPORTEMENT AGRO-PHYSIOLOGIQUE DE QUELQUES GENOTYPES DE BLE DUR SOUS CLIMAT SEMI-ARIDE

(facteur 2, 24,4 %) et HP (facteur 3, 17,2 %) exercent un effet indirect. Ces résultats mettent en évidence les principales variables influençant la variabilité des rendement grainier et permettent de mieux comprendre les relations entre les traits agronomiques du blé dur.

Tableau 15: Analyse factorielle des huit caractères agronomiques en 2021-22

2021-22				
Variables	Facteur 1	Facteur 2	Facteur 3	Communalité (0-1)
RDT	0,965	0,220	-0,125	0,995
PMG	0,356	0,085	-0,463	0,349
NEm⁻²	0,635	0,024	-0,246	0,464
NGE	0,571	-0,364	-0,213	0,504
NJE	-0,022	0,167	0,454	0,235
HP	-0,390	0,268	0,878	0,995
BIO	0,397	0,890	0,135	0,967
IR	0,179	-0,933	-0,214	0,949
Valeurs propres	2,128	1,951	1,377	5,456
Proportion de la variance	0,266	0,244	0,172	
Cumule de la variance %	26,6	51	68,2	

Tableau 16: Résumé des coefficients de saturation des facteurs pour les huit caractères étudiés 2021-22

2021-22			
Variables	Valeurs propres	% Cumule variance	Facteurs retenus
Facteur 1	2,128	26,6	NEm⁻²
<i>RDT</i>	0,965		
<i>NEm⁻²</i>	0,635		
<i>NGE</i>	0,571		
Facteur 2	1,951	24,4	BIO IR
<i>BIO</i>	0,890		
<i>IR</i>	-0,933		
Facteur 3	1,377	17,2	HP
<i>NJE</i>	0,454		
<i>HP</i>	0,878		
<i>PMG</i>	-0,463		

6.7 Classification Hiérarchique Ascendante (CAH)

6.7.1 Classification des variables

L'analyse de classification hiérarchique réalisée en 2020-21 révèle quatre groupes distincts de variables (Figure 17). Le premier cluster regroupe NJE, le deuxième cluster regroupe le PMG. Tandis que le troisième cluster inclut NEm⁻², RDT, IR, NGE et HP, montrant que ces variables sont fortement corrélées et peuvent influencer ensemble le rendement, le

dernier cluster regroupe la Biomasse.

L'analyse de classification hiérarchique réalisée en 2021-22 révèle quatre groupes distincts de variables, illustrant leurs relations et influences potentielles. Le premier cluster regroupe RDT, NEm² et NGE, indiquant une forte corrélation entre ces variables, qui semblent jouer un rôle clé dans le rendement et les paramètres de croissance. Le deuxième cluster est constitué de IR et PMG, le troisième cluster regroupe HP et NJE. Enfin, le quatrième cluster regroupe la Biomasse.

Ces observations sont en accord avec les résultats de Fellahi et *al*, (2013), qui ont identifié le nombre d'épis, le nombre des grains par épi comme étant les variables les plus associées au rendement en grain.

6.7.2 Classification des génotypes

En 2020-21, l'analyse de classification hiérarchique des génotypes identifie trois groupes distincts (Figure 17). Le premier cluster, regroupant OB BF, BOS BF et GTA BF, se caractérise par de faibles valeurs de PMG et NJE, mais se distingue par de bonnes performances en termes de rendement et de ses composantes. Le deuxième cluster, comprenant GTA ITGC, OB AO et GTA AO, correspond à des comportements tardifs présentant des valeurs faibles pour l'ensemble des variables, suggérant une productivité plus limitée. Enfin, le troisième cluster, constitué de BOS ITGC, BOS AO et OB ITGC, affiche des valeurs intermédiaires pour PMG, BIO et RDT, avec une hauteur réduite.

En 2021-22, l'analyse de classification hiérarchique des génotypes révèle trois groupes distincts. Le premier cluster, composé de GTA BF, BOS BF et OB BF, se distingue par sa précocité, des valeurs élevées de PMG, IR et NGE, ainsi qu'une biomasse réduite. Le deuxième cluster, comprenant OB ITGC et GTA ITGC, est caractérisé par une forte biomasse BIO, RDT et NEm⁻², suggérant un développement végétatif important. Enfin, le troisième cluster, regroupant BOS ITGC, GTA AO, BOS AO et OB AO, présente des valeurs plus faibles pour RDT, NEm⁻² et NGE, reflétant une productivité moindre, probablement en raison d'un nombre réduit d'épis ou d'une moindre capacité de remplissage des grains. Ces différences de comportement entre les génotypes pourraient être influencées par l'effet du site, soulignant l'importance de la sélection variétale pour identifier les génotypes les plus performants en termes de rendement et d'adaptation aux conditions culturales.

CHAPITRE II : COMPORTEMENT AGRO-PHYSIOLOGIQUE DE QUELQUES GENOTYPES DE BLE DUR SOUS CLIMAT SEMI-ARIDE

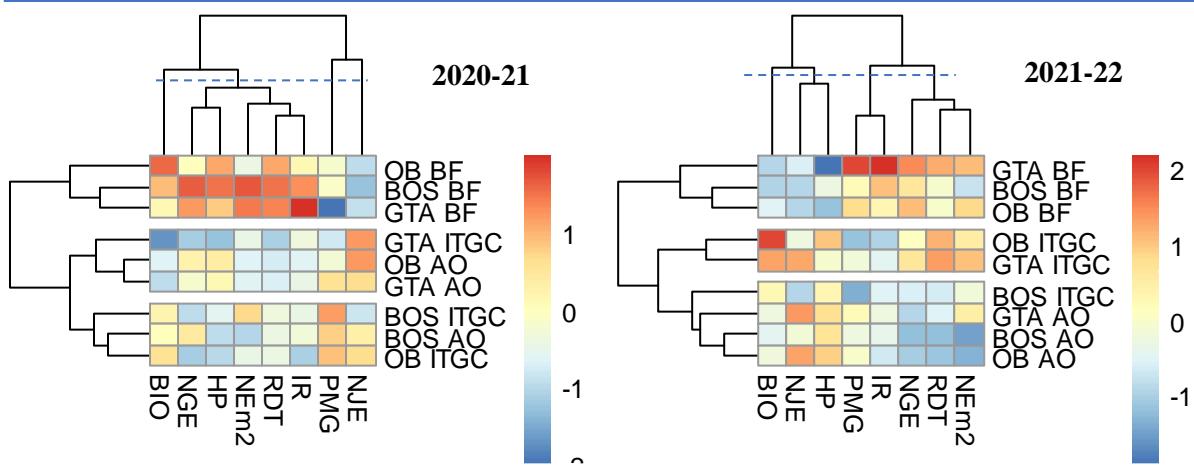


Figure 18: Niveaux de similarité des variables estimées et des génotypes du blé dur à l'aide de l'analyse de classification hiérarchique.

7. Combinaison des analyses effectué

Le Tableau 17 présente les scores des facteurs influençant le rendement en grains sur deux campagnes agricoles (2020-21 et 2021-22) ainsi que leur moyenne. Les résultats montrent que la biomasse et la hauteur des plantes sont les principaux facteurs influençant le rendement en grains, avec des scores moyens de 6,5 et 4,5 respectivement. Les variables NEm^{-2} , NGE et IR présentent un effet modéré (score moyen de 4), tandis que PMG et NJE ont un impact plus faible et variable selon les années. Une forte baisse d'influence est observée pour PMG et HP en 2021-22, suggérant une sensibilité aux conditions environnementales. En revanche, NGE et IR restent relativement stables, indiquant une contribution plus constante au rendement. Ainsi, la biomasse et la hauteur des plantes apparaissent comme des indicateurs fiables pour améliorer la productivité du blé dur.

Tableau 17: Score des facteurs influençant le rendement en grains 2020-21 et 2021-22.

Variables	R	Reg	Step	FA	ACP	Path	Cluster	Score 20-21*	Score 21-22	Score Moyenne
PMG	■	*	*	*		*		4	1	2,5
NEm²	* ■			* ■	* ■		* ■	4	4	4
NGE	* ■	■	■		*	■	* ■	3	5	4
NJE	*			*	*			3	0	1,5
HP	* ■	*	* ■		*	* ■	*	6	3	4,5
BIO	* ■	* ■	* ■	* ■	* ■	* ■	*	7	6	6,5
IR	*	* ■	* ■	■	*	■		4	4	4

R : Analyse de corrélation simple, Reg : analyse de régression multiple, Step : Analyse par étape, FA : Analyse factorielle, ACP : Analyse en composante principale, Path : Analyse de chemin, Cluster : Classification Hiérarchique Ascendante.

CHAPITRE II : COMPORTEMENT AGRO-PHYSIOLOGIQUE DE QUELQUES GENOTYPES DE BLE DUR SOUS CLIMAT SEMI-ARIDE

Conclusion

Cette étude a permis d'évaluer le comportement phéno-morphologique et agro-physiologique de plusieurs génotypes de blé dur en conditions semi-arides. Les conditions climatiques ont montré une forte variabilité inter-mensuelle et interannuelle, marquée par des températures estivales plus élevées et une pluviométrie hivernale plus faible au cours des deux saisons de culture, ce qui a eu un impact négatif sur la croissance et le rendement du blé dur.

L'analyse de la variance a révélé une influence significative des conditions environnementales sur la performance des génotypes. Le site et l'année ont exercé des effets notables sur la variation génotypique de la teneur relative en eau, de la vitesse de perte en eau et de la température du couvert végétal. L'année s'est avérée être le principal facteur environnemental influençant les caractères phéno-morphologiques, tandis que le site et l'interaction Génotype x Année ont affecté la quasi-totalité des paramètres agronomiques. Ces résultats confirment que le comportement des génotypes est modulé par les conditions environnementales interannuelles, inter-sites et/ou par leurs interactions.

Le classement des génotypes en fonction des variables agronomiques, établi à partir des comparaisons de moyennes (LSD), a montré que le génotype Boussellam se distinguait par les meilleures performances agronomiques. Le génotype GTA dur a enregistré un rendement en grain moyenne de 32,37 q.h⁻¹ supérieure à Oued El Bared (31,01 q.h⁻¹) et Boussellam (30,32 q.h⁻¹). En revanche, un effet très hautement significatif du site a été détecté ($p<0,001$), avec un rendement nettement supérieur à Béni Fouda, atteignant 38,64 q.h⁻¹, dépassant celui de l'ITGC de 22,46 % et celui d'Ain Oulmene de 34,99 %. Par ailleurs, la différence entre les saisons était significative ($p<0,05$), la campagne 2021-22 s'est révélée plus favorable, avec un rendement supérieur de 5,42 % par rapport à 2020-21.

Les analyse de corrélations ont montré que la TRE est un bon indicateur de tolérance au stress hydrique, étant positivement liée au rendement et au nombre d'épis par mètre carré, et négativement corrélée à la température du couvert végétal. Les génotypes capables de maintenir une TRE élevée ont affiché une meilleure stabilité en conditions de sécheresse. En termes de phéno-morphologie, une surface foliaire plus importante et une hauteur de plante modérée ont été associées à un meilleur rendement, bien que ces effets varient selon les conditions climatiques annuelles. L'analyse des corrélations a montré que le rendement en grains est fortement influencé par le nombre d'épis par mètre carré, la biomasse et le nombre de grains par épi, tandis que la température du couvert végétal et le nombre de jours avant l'épiaison

CHAPITRE II : COMPORTEMENT AGRO-PHYSIOLOGIQUE DE QUELQUES GENOTYPES DE BLE DUR SOUS CLIMAT SEMI-ARIDE

(NJE) ont un effet négatif sur la productivité.

L'analyse de régression multiple a démontré que la biomasse et l'indice de récolte sont les principaux déterminants du rendement, expliquant 98,2 % de la variabilité en 2020-21 et 89,2 % en 2021-22.

La classification hiérarchique a permis d'identifier trois groupes distincts de génotypes. Les génotypes BOS, OB et GTA dur semés à Beni Fouda ont montré les meilleures performances en termes de rendement, tandis que ceux d'Ain Oulmène et GTA dur de ITGC ont affiché les rendements les plus faibles, confirmant l'effet significatif du site sur la variabilité des performances agronomiques.

Les résultats obtenus permettent d'orienter les programmes de sélection vers des génotypes plus performants et mieux adaptés aux conditions climatiques des hauts plateaux, en mettant l'accent sur l'amélioration de la biomasse, de l'efficience d'utilisation des ressources et de la capacité d'adaptation aux variations climatiques. Cela passe par une meilleure optimisation de l'eau et des nutriments, une photosynthèse plus efficace, ainsi qu'une tolérance accrue à la sécheresse et aux températures élevées. Ces caractéristiques permettent de garantir une production plus stable et durable dans les environnements semi-arides.

CHAPITRE III

Évaluation des paramètres de remplissage du grain chez différents génotypes de blé dur (*Triticum durum Desf.*)

CHAPITRE III : ÉVALUATION DES PARAMETRES DE REMPLISSAGE DU GRAIN CHEZ DIFFERENTS GENOTYPES DE BLE DUR (*TRITICUM DURUM DESF.*)

CHAPITRE III

الملخص

يُعد القمح الصلب (*Triticum durum Desf.*) من المحاصيل الأساسية في منطقة البحر الأبيض المتوسط، وهو معرض بشكل خاص لخسائر في الغلة بسبب الجفاف. تهدف هذه الدراسة إلى تقييم ديناميكية امتلاء الحبوب لدى ثلاثة طرز وراثية من القمح الصلب (بوسلام، وادي البارد، و جيتيما دور) مزروعة في ثلاثة مواقع شبه جافة من منطقة سطيف (الجزائر)، خلال موسمين زراعيين (21-2020-2021). هدف البحث إلى دراسة تأثير معلمات عملية امتلاء الحبوب على التغير في الوزن الأقصى للحبوب وعلاقتها بالمردود الحبي. تتبع عملية تراكم المادة الجافة منحنى سيموميدي، وتختلف مدة الامتلاء حسب الطراز الوراثي والموقع والسنة. أظهر تحليل التباين أن مدة الامتلاء (DRG) تتأثر بشكل كبير بالطراز الوراثي، والظروف المناخية، وتفاعلها معًا. تميز صنف وادي البارد بوزن حبة أقصى (PMAX) وبمعدل امتلاء (TRG) مرتفع، بينما أظهر صنف GTA مدة امتلاء أطول لكن بوزن حبة أدنى. بيّنت نتائج تحليل الانحدار الخطي المتعدد أن معدل الامتلاء (TRG) هو العامل الرئيسي المؤثر في الوزن الأقصى للحبوب، يليه الشدة المطلقة للامتلاء (IAR). إذ يزداد وزن الحبة القصوى بمقدار 0.0012 ملغم مقابل كل زيادة بمقدار 1 ملغم/يوم في معدل امتلاء الحبوب. في المقابل، لم تُظهر لا السرعة القصوى للامتلاء (VMR) ولا مدة الامتلاء (DRG) تأثيراً مباشراً معنوياً على الوزن الأقصى للحبة. أما فيما يتعلق بالمردود الحبي، فتُعد مدة الامتلاء (DRG) ومعدل الامتلاء (TRG) من العوامل الأكثر تحديداً. وتبرز هذه النتائج أهمية اختيار طرز وراثية تجمع بين سرعة امتلاء جيدة ومدة كافية، لضمان مردودية مستقرة في المناخات شبه الجافة.

الكلمات المفتاحية : القمح الصلب، امتلاء الحبوب، المردود الحبي، الانحدار الخطي، منحنى سيموميدي.

CHAPITRE III : ÉVALUATION DES PARAMETRES DE REMPLISSAGE DU GRAIN CHEZ DIFFERENTS GENOTYPES DE BLE DUR (*TRITICUM DURUM* DESF.)

Résumé

Le blé dur (*Triticum durum* Desf.), est une culture essentielle dans la région méditerranéenne, est particulièrement vulnérable aux pertes de rendement causées par la sécheresse. Cette étude évalue la dynamique du remplissage des grains chez trois génotypes de blé dur (Boussellam, Oued El-Bared et GTA-dur) cultivés dans trois sites semi-arides de la région de Sétif (Algérie), durant deux campagnes agricoles (2020-21 et 2021-22). L'objectif visait à évaluer l'influence des paramètres du remplissage du grain sur la variation du poids maximal des grains et leur relation avec le rendement en grain. L'accumulation de matière sèche suit une courbe sigmoïde, la durée de remplissage varie selon les génotypes, les sites et les années. L'analyse de la variance montre que la durée de remplissage (DRG) est fortement influencée par le génotype, les conditions climatiques et leur interaction. OB se distingue par un PMAX et un taux de remplissage (TRG) élevés, tandis que GTA présente une durée de remplissage plus longue, mais un poids de grain moindre. L'analyse de régression multiple indique que le TRG est le principal facteur influençant le PMAX, suivi par l'intensité absolue de remplissage (IAR), le poids maximal des grains (PMAX) augmente de 0,0012 mg pour chaque augmentation de 1 mg/jour du taux de remplissage des grains (TRG). En revanche, ni la vitesse maximale (VMR) ni la durée (DRG) n'ont un effet direct significatif sur le poids maximal des grains. Pour le rendement en grain, la DRG et le TRG sont les facteurs les plus déterminants. Ces résultats soulignent l'importance de sélectionner des génotypes alliant une bonne vitesse de remplissage et une durée suffisante, pour garantir des rendements grenier stables en climat semi-aride.

Mots clés : Blé dur, Remplissage du grain, Rendement en grain, Régression linéaire, Courbe sigmoïde.

CHAPITRE III : ÉVALUATION DES PARAMETRES DE REMPLISSAGE DU GRAIN CHEZ DIFFERENTS GENOTYPES DE BLE DUR (*TRITICUM DURUM DESF.*)

Abstract

Durum wheat (*Triticum durum Desf.*), a staple crop in the Mediterranean region, is particularly vulnerable to yield losses caused by drought. This study evaluates the grain filling dynamics of three durum wheat genotypes (Boussellam, Oued El-Bared, and GTA-dur) grown in three semi-arid sites in the Sétif region (Algeria) over two growing seasons (2020-21 and 2021-22). The objective was to assess the influence of grain filling parameters on the variation of maximum grain weight and their relationship with grain yield. Dry matter accumulation follows a sigmoidal curve, and the duration of grain filling varies depending on genotype, site, and year. Analysis of variance showed that the grain filling duration (DRG) is significantly influenced by genotype, climatic conditions, and their interaction. Oued El-Bared stood out with high maximum grain weight (PMAX) and grain filling rate (TRG), while GTA exhibited a longer filling duration but lower grain weight. Multiple regression analysis indicated that TRG is the main factor influencing PMAX, followed by absolute filling intensity (IAR); the PMAX increases by 0.0012 mg for each 1 mg/day increase in TRG. In contrast, neither the maximum filling rate (VMR) nor the duration (DRG) had a significant direct effect on PMAX. For grain yield, both DRG and TRG were the most determining factors. These results highlight the importance of selecting genotypes that combine a good filling rate with sufficient duration to ensure stable yields under semi-arid conditions.

Keywords: Durum wheat, Grain filling, Grain yield, Linear regression, Sigmoidal curve.

CHAPITRE III : ÉVALUATION DES PARAMETRES DE REMPLISSAGE DU GRAIN CHEZ DIFFERENTS GENOTYPES DE BLE DUR (*TRITICUM DURUM* DESF.)

INTRODUCTION

Dans les régions méditerranéennes, le blé dur (*Triticum durum* Desf.) joue un rôle central dans la sécurité alimentaire, tant par sa valeur nutritionnelle que par sa place dans les systèmes agricoles. En Algérie, cette culture est d'autant plus stratégique que le pays figure parmi les plus grands consommateurs et importateurs de céréales au monde (Benalia, 2022). Toutefois, la production nationale de blé dur reste soumise à des contraintes agro-climatiques majeures, notamment la sécheresse et les températures élevées, caractéristiques des zones semi-arides où se situe l'essentiel du bassin céréalier (Boudjabi et al., 2017).

Parmi les différentes étapes de développement de la plante, la phase de remplissage du grain constitue un déterminant clé du rendement final. Cette phase, qui s'étend de l'anthèse à la maturité physiologique, correspond à l'accumulation de matière sèche dans les grains, influençant directement le poids de mille grains (PMG), un indicateur majeur du rendement. Deux paramètres caractérisent cette phase : la durée du remplissage et la vitesse à laquelle le grain accumule les réserves. Leur interaction conditionne non seulement le poids final des grains, mais aussi leur qualité technologique et nutritionnelle (Hutsch et al., 2019).

Dans les environnements à forte variabilité climatique, tels que les zones semi-arides algériennes, cette phase est particulièrement sensible aux stress abiotiques comme la chaleur et le déficit hydrique. Une réduction de la durée de remplissage, fréquente en cas de conditions défavorables, n'est souvent pas compensée par une augmentation du taux de remplissage, ce qui se traduit par une baisse significative du rendement (Impa et al., 2021 ; Dubey et al., 2020).

Face à ces enjeux, l'étude des paramètres de remplissage du grain chez différents génotypes de blé dur s'avère essentielle pour identifier les cultivars les plus performants dans ces contextes climatiques contraignants. Comprendre comment chaque génotype réagit en termes de vitesse et de durée de remplissage permet d'orienter les programmes de sélection variétale vers des plantes mieux adaptées aux effets du changement climatique (Scafaro & Atkin, 2016).

Dans cette perspective, le présent travail a pour objectif d'évaluer la dynamique du remplissage du grain chez plusieurs génotypes de blé dur, cultivés dans trois sites dans la wilaya de Sétif. Plus précisément, il s'agit de quantifier la vitesse et la durée du remplissage, et d'examiner ses effets sur le poids des grains et le rendement final, dans des conditions représentatives des zones semi-aride.

CHAPITRE III : ÉVALUATION DES PARAMETRES DE REMPLISSAGE DU GRAIN CHEZ DIFFERENTS GENOTYPES DE BLE DUR (*TRITICUM DURUM* DESF.)

MATERIELS ET METHODES :

1. Matériel végétal et dispositif expérimental

L'expérimentation a été conduite durant les campagnes agricoles 2020–21 et 2021–22 sur trois sites à climat semi-aride dans la région de Sétif (Algérie) : la station de l'ITGC, Ain Oulmène, et Béni Fouda. Trois génotypes de blé dur (*Triticum durum Desf.*), à savoir Boussellam (BOS), Oued El Bared (OB) et GTA dur (GTA), ont été évalués selon un dispositif en blocs complètement randomisés avec trois répétitions, à une densité de semis de 300 graines/m².

2. Mesures agronomiques et paramètres de remplissage du grain

De la floraison jusqu'à la maturité physiologique, des échantillons ont été prélevés à neuf dates distinctes pour chaque génotype, dans le but d'évaluer le nombre de grains, le poids sec ainsi que la cinétique du remplissage du grain. À chaque date, cinq épis représentatifs par génotype ont été récoltés à partir du début du remplissage du grain, puis séchés dans une étuve à 80 °C pendant 48 heures Afin de déterminer leur poids sec. Les dates d'évaluation ont été exprimées en sommes de températures moyennes journalières accumulées après la floraison. Le rendement en grains (RDT, en q.h⁻¹) est défini par le poids des grains récoltés sur une superficie de 2,25 m².

Pour analyser la dynamique du remplissage, six paramètres de remplissage des grains ont été étudiés et calculés selon les formules suivantes :

1- **Le poids maximal des grains** (PMAX, mg) a été déterminé en calculant la moyenne du poids sec d'un seul grain récolté lors de la dernière date d'échantillonnage (Vesna *et al.*, 2018).

2- **L'intensité absolue de la vitesse de remplissage des grains** (IAR, mg/jour) a été calculée selon la formule de Radford (1967) :

$$IAR = W_2 - W_1 / T_2 - T_1$$

3- **L'accumulation de matière sèche** au fil du temps a été exprimée en degrés-jours (GDD, °C) accumulés depuis l'anthèse, calculés par l'addition des degrés-jours quotidiens (Tn) selon la formule de Baker *et al.*, (1986) :

$$T_n = ((T_{\max} + T_{\min})/2) - T_b$$

4- **La durée du remplissage des grains** (DRG, °C) a été calculée selon la méthode décrite par Vesna *et al.*, (2018) :

$$DRG = \text{Accumulation des degrés-jours (GDD) depuis l'anthèse.}$$

CHAPITRE III : ÉVALUATION DES PARAMETRES DE REMPLISSAGE DU GRAIN CHEZ DIFFERENTS GENOTYPES DE BLE DUR (*TRITICUM DURUM* DESF.).

5- **Le taux de remplissage des grains** (TRG, mg/jour) a été calculé selon la méthode de Vesna *et al.*, (2018) :

$$\text{TRG} = \text{Poids sec du grain final} / \text{Durée du remplissage des grains (DRG)}.$$

6- **La vitesse maximale de remplissage des grains** (VMR, mg/jour) a été calculé selon la méthode de Brdar *et al.*, (2004) :

$$\text{VMR} = \text{Estimé en fonction de l'IAR pour chaque génotype.}$$

Où :

W1 et **W2** sont les poids secs des grains aux moments T1 et T2, respectivement.

Tn: degré-jour quotidien ; **Tmax** : température extrême journalière ; **Tmin**: température minimale journalière ; **Tb**: température de base (0°C).

3. Analyse statistique

Afin d'évaluer les différences significatives entre les génotypes, une analyse de la variance à deux facteurs (ANOVA) a été réalisée. Le test de comparaison de moyennes de Fisher (LSD) a été utilisé pour comparer les moyennes. Des analyses de régression linéaire multiple et l'analyse de chemin (*Path Analysis*) ont été effectuées pour déterminer les relations et les effets statistiques des variables et évaluer la signification des effets à l'aide du logiciel RStudio Team, utilisant

R version 4.5.0.

RESULTATS ET DISCUSSION

1. Évolution du remplissage des grains

L'accumulation de matière sèche par grain a suivi une courbe sigmoïde, en accord avec les travaux antérieurs de Pirasteh *et al.* (2019). La croissance des grains a d'abord progressé lentement jusqu'au 15e jour en 2020-21 et au 17e jour à Béni Fouda, après quoi elle a connu une phase de progression linéaire rapide avant de se stabiliser à la maturité physiologique (Figure 18). La durée du remplissage des grains a varié selon les génotypes et les sites.

À Ain Oulmène 2020-21, cette durée allait de 31 jours pour Oued El-Bared à 37 jours pour GTA-dur et Boussellam. À l'ITGC, Boussellam présentait la durée la plus longue avec 43 jours, tandis que GTA-dur et Oued El-Bared avaient respectivement des durées de 31 et 37 jours, avec une moyenne générale de 37 jours.

De même, à Béni Fouda, la durée de remplissage variait de 37 jours pour Oued El-Bared à 43 jours pour Boussellam et GTA-dur, avec une moyenne de 41 jours. En outre, il a été

CHAPITRE III : ÉVALUATION DES PARAMETRES DE REMPLISSAGE DU GRAIN CHEZ DIFFERENTS GENOTYPES DE BLE DUR (*TRITICUM DURUM* DESF.)

observé que Boussellam affichait constamment un poids de grain plus élevé à maturité comparé aux autres génotypes, et ce, sur tous les sites. Cela pourrait s'expliquer par divers facteurs, notamment les caractéristiques génétiques et l'effet des conditions environnementales.

En 2021-22, une variation significative du DRG a été observée dans les trois sites d'étude, où la DRG variait de 35 jours pour Boussellam et GTA-dur à 39 pour OB à Ain Oulmène, de 31 à 39 jours à l'ITGC pour respectivement Boussellam, Oued El-Bared et GTA-dur, tandis qu'à Beni Fouda, elle a varié de 24 à 32 jours. Selon Bergkamp et *al.* (2018), le stress thermique après l'anthèse entraîne une réduction de la durée de remplissage des grains, ce qui conduit par conséquent à une diminution du poids des grains. Toutefois, certains génotypes tolérants à la chaleur ont réussi à maintenir une durée de remplissage relativement longue, combinée à un taux de remplissage du grain (TRG) élevé, ce qui a permis de préserver un poids et une taille de grain satisfaisants (Shirdelmoghanloo et *al.*, 2022).

2. Sources de variation des composantes du remplissage du grain

Le tableau 18 présente les résultats de l'analyse de la variance combinée (ANOVA) appliquée à cinq paramètres liés au remplissage du grain. L'effet du génotype est très hautement significatif pour la durée de remplissage (DRG) ($p<0,001$), ce qui indique une variation génétique importante sur ce trait. Il est également significatif pour PMAX ($p<0,05$) et IAR ($p<0,01$), tandis qu'aucun effet significatif n'est observé pour TRG et VMR, suggérant que ces deux dernières variables sont moins influencées par le fond génétique. Selon Du et *al.* (2019), les facteurs génétiques peuvent contribuer à la formation du poids du grain, en influençant la vitesse et la durée du remplissage du grain ainsi que leurs interactions.

L'effet de l'année est très hautement significatif ($p<0,001$) pour l'ensemble des paramètres, soulignant l'effet dominant des conditions climatiques interannuelles, notamment sur le poids final des grains, la durée du remplissage, ainsi que DRG, IAR et VMR de remplissage. De même, le site a un effet significatif à très hautement significatif sur PMAX, TRG, IAR et DRG, mais reste non significatif pour VMR, ce qui montre que les conditions environnementales locales modulent fortement la durée et l'intensité du remplissage.

Les interactions entre génotype et année ainsi qu'entre génotype et site sont significatives notamment pour PMAX, TRG et surtout DRG, ce qui révèle une instabilité de réponse des génotypes selon les années et les sites. L'interaction triple (génotype x année x site) est hautement significative pour DRG, soulignant la complexité du contrôle de ce caractère, à la fois génétique et environnemental. En résumé, la durée de remplissage des grains (DRG) se

CHAPITRE III : ÉVALUATION DES PARAMETRES DE REMPLISSAGE DU GRAIN CHEZ DIFFERENTS GENOTYPES DE BLE DUR (*TRITICUM DURUM* DESF.).

distingue comme le paramètre le plus sensible à la variabilité génétique et aux conditions agro-climatiques, ce qui en fait un critère stratégique pour la sélection de génotypes performants et stables dans des contextes variés. Selon Sanjari et al, (2011), la durée de remplissage des grains dépendait fortement de l'environnement, qui expliquait 22,1 % de la variation totale, bien que, nos résultats montrent que l'environnement explique environ 53,34 % de la variabilité du DRG. D'après Wu et al, (2018), un poids de grain stable peut être obtenu grâce à un équilibre entre les différentes phases du remplissage du grain. Si l'un de ces éléments ne varie pas, cela peut rendre la taille du grain instable.

Tableau 18: Carrés moyens de l'ANOVA combinée des paramètres du remplissage du grain.

Source de variation	df	PMAX	TRG	IAR	VMR	DRG
Génotype	2	30,35*	4,08e ⁻⁵ ns	0,035**	0,002 ^{ns}	25070,04***
Année	1	8151,28***	0,003***	0,27***	0,21***	161323,87***
Site	2	65,99**	7,80e ⁻⁵ ***	0,034**	0,028 ^{ns}	109383,61***
Génotype x Année	2	195,32***	2,63e ⁻⁴ ***	0,011 ^{ns}	0,002 ^{ns}	54801,378***
Génotype x Site	4	32,16*	4,34e ⁻⁵ *	0,01 ^{ns}	0,002 ^{ns}	33584,23***
Année x Site	2	18,62 ^{ns}	2,09e ⁻⁵ ns	0,02*	0,01 ^{ns}	105830,45***
Génotype x Site x Année	4	16,71 ^{ns}	2,26e ⁻⁵ ns	0,01 ^{ns}	5,51e ⁻⁴	55963,697***
Erreur	68	9,67	1,38e ⁻⁵	0,006	0,015	1,109e ⁻¹¹

PMAX: Poids maximal des grains, TRG: Taux de remplissage des grains, IAR: Intensité absolue de la vitesse de remplissage des grains, VMR: Vitesse Maximale de remplissage des grain, DRG: Durée du remplissage des grains.

CHAPITRE III : ÉVALUATION DES PARAMETRES DE REMPLISSAGE DU GRAIN CHEZ DIFFERENTS GENOTYPES DE BLE DUR (*TRITICUM DURUM* DESF.)

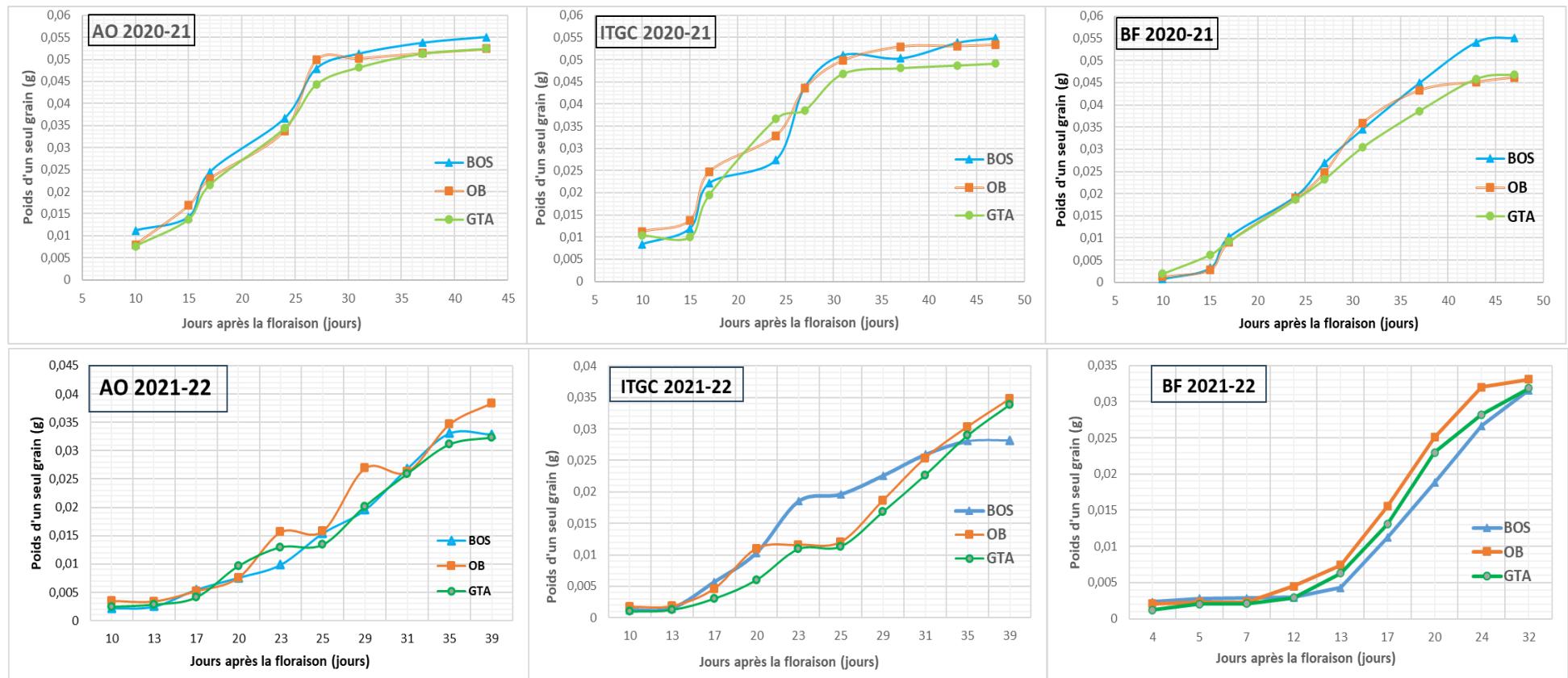


Figure 19: Cinétique du remplissage du grain (g) pour trois génotypes, Boussellam (BOS), Oued El-Bared (OB) et GTA-dur (GTA), sur les trois sites de culture : Ain Oulmene (AO), (ITGC) et Beni Fouda (BF).

CHAPITRE III : ÉVALUATION DES PARAMETRES DE REMPLISSAGE DU GRAIN CHEZ DIFFERENTS GENOTYPES DE BLE DUR (*TRITICUM DURUM* DESF.)

L'analyse des moyennes affichées dans le tableau 19 a révélé des variations significatives entre les génotypes les sites et les campagnes agricoles pour l'ensemble des paramètres mesurés : PMAX (poids maximum des grains), TRG (taux de remplissage des grains), DRG (durée de remplissage des grains), VMR (vitesse maximale de remplissage) et IAR (intensité absolue de la vitesse de remplissage). Parmi les génotypes, OB se distingue par les valeurs les plus élevées en PMAX (43,06) et TRG (0,049), indiquant une capacité supérieure à accumuler rapidement du poids dans les grains, bien que sa durée de remplissage (DRG) soit plus courte (712,34). À l'inverse, GTA présente une durée de remplissage plus longue (769,00) mais un poids maximal des grains plus faible (41,15), suggérant un remplissage prolongé mais moins intense. BOS, quant à lui, affiche des valeurs intermédiaires pour la plupart des paramètres. Du point de vue des sites, AO offre les conditions les plus favorables à l'accumulation du poids des grains, avec un PMAX élevé (43,75), une VMR importante (0,202) et la meilleure IAR (0,151), traduisant un remplissage rapide et efficace. BF, en revanche, présente la durée de remplissage la plus longue (809,31), mais des valeurs plus faibles en PMAX (40,79) et IAR (0,084), ce qui indique une efficacité moindre malgré un temps plus long. ITGC montre des performances intermédiaires. Ces résultats soulignent l'effet conjoint du génotype, du site et de l'année sur les caractéristiques du remplissage des grains, et l'importance de choisir des génotypes adaptés aux conditions locales pour optimiser le rendement.

Tableau 19: Moyennes génotypiques des paramètres de remplissage des grains durant les deux campagnes.

Environnement	Genotypes	PMAX	TRG	DRG	VMR	IAR
	BOS	42,66 (ab)	0,048 (ab)	750,60 (b)	0,183 (a)	0,149 (a)
	OB	43,06 (a)	0,049 (a)	712,34 (c)	0,184 (a)	0,128 (a)
	GTA	41,15 (b)	0,047 (b)	769,00 (a)	0,167 (a)	0,081 (b)
	LSD 5%	1,60	0,001	1,71	0,06	0,042
	Mean	42,29	0,048	743,98	0,178	0,119
AO		43,75 (a)	0,049 (a)	690,21 (c)	0,202 (a)	0,151 (a)
ITGC		42,34 (ab)	0,048 (ab)	732,42 (b)	0,188 (a)	0,123 (ab)
BF		40,79 (b)	0,046 (b)	809,31 (a)	0,143 (a)	0,084 (b)

PMAX: Poids maximal des grains, TRG: Taux de remplissage des grains, IAR: Intensité absolue de la vitesse de remplissage des grains, VMR: Vitesse Maximale de remplissage des grain, DRG: Durée du remplissage des grains.

CHAPITRE III : ÉVALUATION DES PARAMÈTRES DE REMPLISSAGE DU GRAIN CHEZ DIFFÉRENTS GENOTYPES DE BLE DUR (*TRITICUM DURUM* DESF.).

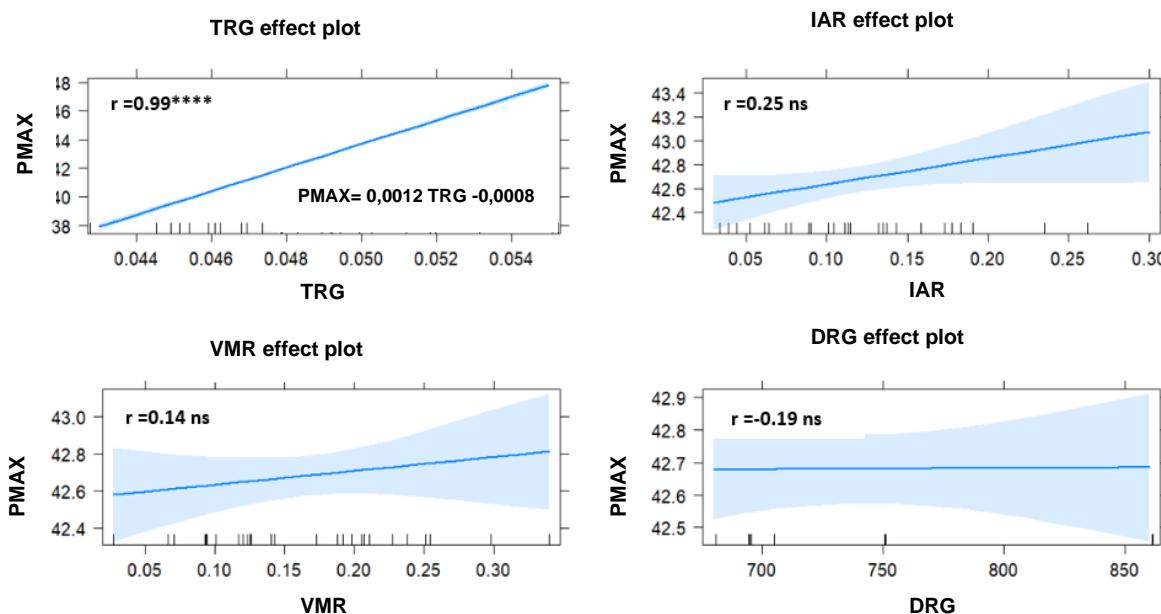


Figure 20: Effets des paramètres de remplissage sur le poids maximal des grains.

3. Analyse des facteurs explicatifs du poids maximal des grains

La figure 19 présente les effets partiels issus de régressions linéaires, illustrant l'effet de quatre paramètres du remplissage des grains sur le poids maximum des grains (PMAX). Il ressort que le TRG a une relation positive et très significative avec PMAX, indiquant que plus le remplissage est rapide, plus les grains atteignent un poids élevé. Concrètement, le PMAX augmente de 0,0012 mg pour chaque unité de TRG.

Les résultats présentés dans le tableau 20 indiquent que le poids maximum des grains (PMAX) est principalement déterminé par le taux de remplissage des grains (TRG), qui exerce un effet direct très fort et hautement significatif ($p < 0,001$), indiquant qu'il s'agit du principal déterminant de PMAX Cossani et al., (2011). Sous stress thermique, la plante peut accélérer temporairement le taux de remplissage pour compenser une durée de remplissage raccourcie, tandis que, cette stratégie est limitée et souvent insuffisante si le stress est sévère ou prolongé (Dong et al., 2021). L'intensité absolue de la vitesse de remplissage des grains (IAR) présente également un effet positif et statistiquement significatif, bien que plus modeste ($p < 0,05$) (Tableau 20), suggérant que cette intensité contribue de manière secondaire à l'augmentation du poids des grains. En revanche, la vitesse maximale de remplissage des grains (VMR) et la durée de remplissage des grains (DRG) n'ont pas d'effets significatifs, indiquant qu'elles n'ont pas d'effet direct sur le poids des grains dans ce modèle. Enfin, le coefficient de détermination révèle que 99,3 % de la variation du poids maximal des grains est expliquée par l'ensemble de ces variables, attestant d'un excellent ajustement du modèle. Alors que le PMAX est affecté par

CHAPITRE III : ÉVALUATION DES PARAMETRES DE REMPLISSAGE DU GRAIN CHEZ DIFFERENTS GENOTYPES DE BLE DUR (*TRITICUM DURUM* DESF.)

TRG et IAR, et pas avec DRG. Cela suggère que dans des conditions semi-arides avec sécheresse terminale, un faible TRG conduit à un faible PMAX, et que cela ne peut pas être compensé par une durée de remplissage plus longue.

Tableau 20: Effets directs des variables explicatives sur le poids des grains maximal.

	<i>Coefficient standardisé</i>	<i>Probabilité (p)</i>
PMAX ~		
TRG	0,985***	0,000
IAR	0,045*	0,025
VMR	0,020 ^{ns}	0,304
DRG	0,001 ^{ns}	0,961

PMAX: Poids maximal des grains, TRG: Taux de remplissage des grains, IAR: Intensité absolue de la vitesse de remplissage des grains, VMR: Vitesse Maximale de remplissage des grain, DRG: Durée du remplissage des grains. : p<0,05, ** : p<0,01, *** : p< 0,001, R²= 0,993*

Les résultats du modèle de prédiction du rendement en grains basé sur les paramètres de remplissage (Tableau 21) montrent que plusieurs variables influencent significativement le rendement en grain. La durée de remplissage des grains (DRG) exerce un effet positif très significatif ($p < 0,001$), ce qui indique que plus la période de remplissage est longue, plus le rendement en grains est élevé. Le taux de remplissage des grains (TRG) a également un effet positif et significatif ($p < 0,05$), suggérant qu'une augmentation de la vitesse de transfert des assimilats vers les grains contribue à améliorer le rendement grainier. Selon Bendada et al, (2022) ; Lotfi et al, (2024), la durée de remplissage des grains et le taux de remplissage des grains ont des effets majeurs sur le poids final des grains et peuvent avoir des effets significatifs sur le rendement final.

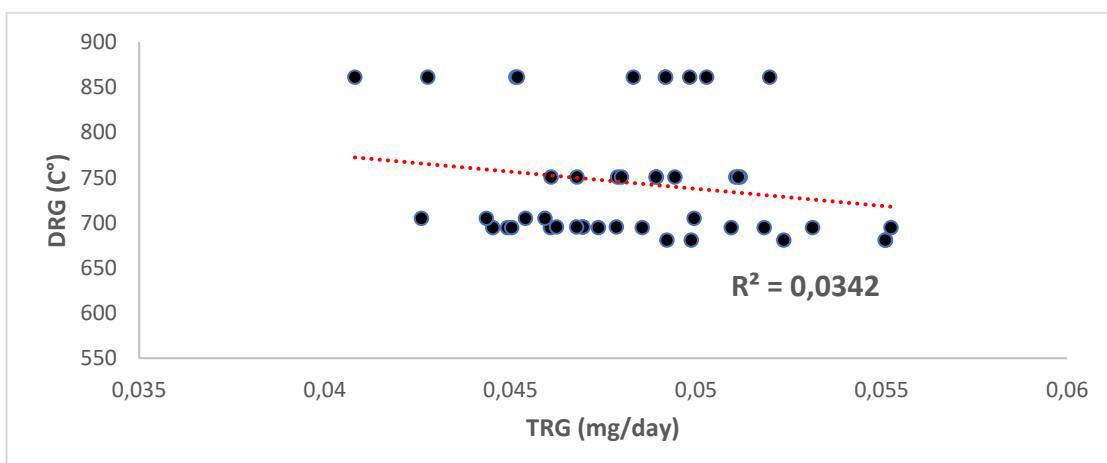


Figure 21: Variation de la durée de remplissage des grains en fonction du taux de remplissage.

CHAPITRE III : ÉVALUATION DES PARAMETRES DE REMPLISSAGE DU GRAIN CHEZ DIFFERENTS GENOTYPES DE BLE DUR (*TRITICUM DURUM* DESF.)

Aucune corrélation détectable entre le taux de remplissage et la durée du remplissage des grains avec un coefficient de corrélation nul (Figure 20), selon Morita et *al.*, (2005), chez le blé dur, il existe une compensation partielle entre la durée et le taux de remplissage des grains, mais elle n'est pas suffisante pour annuler les effets négatifs du stress, tandis que Impa et *al.*, (2021), ont prouvé qu'une augmentation du taux de remplissage des grains ne compense pas la réduction de la durée du remplissage ce qui entraînait un faible poids des grains. Cette observation suggère que les sélectionneurs ont la possibilité d'augmenter simultanément le taux de remplissage des grains et le poids des grains sans prolonger la durée de remplissage. La DRG apparaît comme un trait stratégique dans l'adaptation des cultures à des climats de plus en plus chauds, en contribuant à la stabilité du rendement et de la qualité du grain (Shirdelmoghanloo et *al.*, 2022).

En revanche, le poids maximal des grains (PMAX) présente un effet négatif significatif ($p < 0,05$) (Tableau 21), ce qui pourrait indiquer un compromis entre la taille individuelle des grains et leur nombre total, affectant ainsi le rendement global. Les autres variables, notamment l'intensité absolue de la vitesse de remplissage (IAR) et la vitesse maximale de remplissage (VMR), ont d'effet secondaire dans la prédition du rendement dans ce modèle. Le coefficient de détermination indique que près de 75 % de la variation du rendement en grains est expliquée par les variables incluses dans le modèle, ce qui témoigne d'un bon pouvoir prédictif.

$$\text{Rendement en grain} = -2,12 - 7,07 \text{ PMAX} + 5763,62 \text{ TRG} + 11,80 \text{ IAR} - 1,10 \text{ VMR} + 0,07 \text{ DRG}$$

Tableau 21: Prédiction du rendement en grains basée sur les paramètres de remplissage des grains.

	<i>Coefficient estimé</i>	<i>t de Student</i>	<i>Probabilité (p)</i>
(Intercept)	-2,11641	-0,137	0,8922
PMAX	-7,06603	-2,517	0,0200*
TRG	5763,62296	2,482	0,0216*
IAR	11,80570	0,760	0,4555
VMR	-1,10046	-0,102	0,9200
DRG	0,07071	6,418	2,32e-06***

*PMAX: Poids maximal des grains, TRG: Taux de remplissage des grains, IAR: Intensité absolue de la vitesse de remplissage des grains, VMR: Vitesse Maximale de remplissage des grain, DRG: Durée du remplissage des grains. * : p<0,05, ** : p< 0,01, *** : p< 0,001, R²=0,7481.*

Conclusion

L'étude menée sur trois génotypes de blé dur (Boussellam, Oued El Bared et GTA-dur) dans trois sites semi-arides de la région de Sétif, a permis de mieux comprendre la dynamique du remplissage des grains et ses implications sur le rendement en grain. Les résultats montrent que la dynamique de remplissage suit une courbe de type sigmoïdal, caractérisée par trois phases distinctes : une phase initiale lente, une phase intermédiaire de croissance linéaire rapide, et une phase finale de stabilisation à maturité physiologique. Cette évolution reflète les processus physiologiques de mobilisation et de transfert des assimilats vers les grains.

Les résultats de l'analyse de la variance ont révélé des différences significatives entre génotypes, sites et années pour l'ensemble des paramètres mesurés, confirmant que la phase de remplissage du grain est fortement influencée par les facteurs génétiques et environnementaux.

Parmi les génotypes, Oued El Bared s'est distingué par un poids maximal des grains (PMAX) et un taux de remplissage (TRG) élevés, bien qu'il ait présenté une durée de remplissage (DRG) plus courte. À l'inverse, GTA-dur affichait la plus longue durée de remplissage, mais avec une accumulation de matière sèche plus lente et un poids final des grains plus faible. Boussellam montrait des performances intermédiaires, mais une bonne stabilité entre les sites.

L'analyse de régression a mis en évidence que le TRG est le facteur explicatif le plus déterminant du PMAX, suivi par l'intensité absolue de remplissage (IAR). En revanche, ni la durée (DRG) ni la vitesse maximale (VMR) n'ont montré d'effet direct significatif sur le poids du grain. Cela suggère que, dans des conditions semi-arides avec une sécheresse terminale, un faible TRG conduit à un faible PMAX, ce qui ne peut être compensé par une période de remplissage plus longue. Toutefois, la DRG, le PMAX et le TRG exercent un effet positif important sur le rendement global. Il n'a pas été observé de relation compensatoire efficace entre la durée et le taux de remplissage, ce qui confirme que la sélection de génotypes combinant à la fois une bonne vitesse et une durée suffisante de remplissage est cruciale, notamment en conditions de stress thermique ou hydrique.

Ces résultats ouvrent des perspectives importantes pour les programmes d'amélioration génétique du blé dur en zone méditerranéenne. La DRG et le TRG apparaissent comme des critères clés pour le développement de cultivars à haut rendement et résilients face aux changements climatiques. Une sélection basée sur ces paramètres pourrait permettre de stabiliser les rendements et d'améliorer la qualité du grain, même en présence de contraintes

CHAPITRE III : ÉVALUATION DES PARAMETRES DE REMPLISSAGE DU GRAIN CHEZ DIFFERENTS GENOTYPES DE BLE DUR (*TRITICUM DURUM* DESF.)

agro-climatiques. Des recherches futures intégrant des approches génomiques et phénotypiques fines sont recommandées pour identifier les mécanismes génétiques régulant ces traits et accélérer le progrès génétique.

Chapitre IV

**Modélisation des pertes de
rendement et évaluation de la
qualité de génotypes de blé dur
en zone semi-aride**

CHAPITRE IV : MODELISATION DES PERTES DE RENDEMENT ET EVALUATION DE LA QUALITE DE GENOTYPES DE BLE DUR EN ZONE SEMI-ARIDE

Chapitre IV

المُلْكُوكُ

أجريت هذه الدراسة في ثلاث مناطق من ولاية سطيف (المعهد التقني للزراعة الكبرى ITGC ، عين ولمان وبني فودة) بالجزائر، خلال الموسمين الزراعيين 2020-2021 و 2021-2022. وهدفت إلى تقييم الجودة التكنولوجية لثلاثة طرز وراثية من القمح الصلب [بوسلام(BOS) ، وادي البارد(OB) ، وجيتيا دور(GTA)]، بالإضافة إلى تقدير الخسائر في الغلة الناتجة عن تأخر الحصاد باستخدام نموذج رياضي يربط بين انخفاض رطوبة الحبوب وفقدان الغلة، وذلك وفق تصميم تجريبي بالألواح العشوائية بثلاث مكررات. كما تم تقييم الخسائر الناتجة عن عملية الحصاد الميكانيكي. أظهرت النتائج وجود تأثيرات وراثية معنوية على الخصائص التكنولوجية؛ حيث تراوح محتوى البروتين بين 15.38٪ (GTA) و 17.35٪ (BOS)، أي بزيادة قدرها 7.09٪ عن المتوسط، في حين تراوح الوزن النوعي بين 75.00 و 84.78 كغ/هكتوليتر. وقد تم تسجيل علاقة ارتباط إيجابية ومعنوية بين انخفاض رطوبة الحبوب وفقدان الغلة، مما أتاح بناء نموذج انحدار موثوق بين الغلة المقدرة والمحاكاة. وقد أظهر النموذج أداءً جيداً، حيث بلغ معامل الكفاءة 0.62 (E) ، أي قدرة محاكاة بنسبة 62٪، ودرجة تطابق (D) بلغت 87٪، واختبار T غير معنوي ($p > 0.05$). وبناءً عليه، بعد الوصول إلى النتائج الفيزيولوجي للحبوب، قدر النموذج الرياضي فقداناً في الغلة بنحو 1.0151 قنطار/هكتار لكل انخفاض بنسبة 1٪ في رطوبة الحبوب. كما كشفت دراسة الاستقرار عن سلوك غير مستقر لحسابات القمح خلال موسم 2020-2021، حيث بلغ معامل الانحدار 1.54 (bi) وتبين الانحرافات 1265 (S^2di) ، مما يستدعي إجراء تعديلات تقنية لتحسين أداء الآلة والحد من الخسائر.

الكلمات المفتاحية: القمح الصلب، الجودة التكنولوجية، رطوبة الحبوب، خسائر الحصاد.

CHAPITRE IV : MODELISATION DES PERTES DE RENDEMENT ET EVALUATION DE LA QUALITE DE GENOTYPES DE BLE DUR EN ZONE SEMI-ARIDE

Résumé

Cette étude a été menée dans trois zones de la wilaya de Sétif (ITGC, Ain Oulmène et Béni Fouda), Algérie, durant les campagnes agricoles 2020-21 et 2021-22. Elle visait à évaluer la qualité technologique de trois génotypes de blé dur [Boussellam (BOS), Oued El Bared (OB), GTA dur (GTA)] et à estimer les pertes de rendement dues à la récolte tardive à l'aide d'un modèle mathématique reliant la dégradation de l'humidité des grains et la perte de rendement, selon un dispositif en blocs randomisés à trois répétitions. Les pertes liées au battage mécanique ont également été évaluées. Les résultats ont montré des effets génotypiques significatifs sur les paramètres technologiques : le taux de protéines variait de 15,38 % (GTA) à 17,35 % (BOS), soit +7,09 % par rapport à la moyenne, tandis que le poids spécifique variait entre 75,00 et 78,84 kg.hL⁻¹. Une corrélation positive significative a été observée entre la baisse d'humidité des grains et la perte de rendement en grain, permettant d'établir un modèle de régression fiable entre le rendement estimé et simulé. Ce modèle a présenté une bonne performance, avec un coefficient d'efficacité (E) de 0,62, soit une capacité de simulation de 62%, avec un accord (D) de 87% et d'un T-test $p>0,05$. Par conséquent, après la maturité physiologique des grains, le modèle mathématique a permis d'estimer une perte d'environ 1,0151 q.h⁻¹ pour chaque baisse de 1% d'humidité des grains. L'analyse de stabilité a révélé un comportement très instable des moissonneuses en 2020–21 avec un coefficient de régression $bi=1,54$ et une variance des déviations $S^2d_i=1265$, nécessitant des ajustements pour rendre la machine plus stable et limiter les pertes.

Mots clés : Blé dur, qualité technologique, humidité des grains, pertes de récolte.

CHAPITRE IV : MODELISATION DES PERTES DE RENDEMENT ET EVALUATION DE LA QUALITE DE GENOTYPES DE BLE DUR EN ZONE SEMI-ARIDE

Abstract

This study was conducted in three areas of Sétif province (ITGC, Ain Oulmène, and Béni Fouda), Algeria, during the 2020–21 and 2021–22 growing seasons. It aimed to evaluate the technological quality of three durum wheat genotypes [Boussellam (BOS), Oued El Bared (OB), and GTA-dur (GTA)] and to estimate yield losses due to delayed harvesting using a mathematical model that links grain moisture decline to yield loss. A randomized complete block design with three replications was used. Losses due to mechanical threshing were also assessed. The results showed significant genotypic effects on technological parameters: protein content ranged from 15.38% (GTA) to 17.35% (BOS), representing a 7.09% increase above the average, while test weight varied between 75.00 and 78.84 kg. hL⁻¹. A significant positive correlation was found between the decrease in grain moisture and grain yield loss, allowing for the development of a reliable regression model between estimated and simulated yield. The model showed good performance, with an efficiency coefficient (E) of 0.62 (indicating 62% simulation accuracy), an agreement index (D) of 87%, and a non-significant T-test ($p > 0.05$). Consequently, after the physiological maturity of the grains, the model estimated a yield loss of about 1.0151 q/ha for each 1% decrease in grain moisture. Stability analysis revealed highly unstable combine harvester performance in 2020–21, with a regression coefficient (bi) of 1.54 and a deviation variance ($S^2 di$) of 1265, indicating the need for technical adjustments to improve machine stability and reduce losses.

Keywords: Durum wheat, technological quality, grain moisture, harvest losses.

CHAPITRE IV : MODELISATION DES PERTES DE RENDEMENT ET EVALUATION DE LA QUALITE DE GENOTYPES DE BLE DUR EN ZONE SEMI-ARIDE

Introduction

Les céréales occupent une place essentielle dans les systèmes agricoles à l'échelle mondiale. Selon la FAO (2017), les cultures céréaliers continueront de jouer un rôle clé dans la sécurité alimentaire jusqu'en 2050, contribuant à près de 50 % de l'apport quotidien en calories et en protéines dans les pays à revenu faible et intermédiaire. En 2021, leur production a atteint 2,796 milliards de tonnes (Kugiel, 2022). Le blé dur (*Triticum durum* Desf.) figure parmi les plus anciennes espèces cultivées et constitue une composante majeure de l'alimentation humaine, représentant environ 35 % de la consommation mondiale de céréales et fournissant 15 % des besoins énergétiques (IDRC, 2010). Il reste un aliment essentiel à une alimentation équilibrée et sa consommation est largement recommandée en raison de sa richesse en calories (149 kcal pour 100 g), en amidon, en protéines, en oligo-éléments et en vitamine B1 (Amallah et al., 2016).

En Algérie, la production céréalière moyenne des trois dernières saisons s'élève à 5,23 millions de tonnes, un chiffre bien inférieur à la demande estimée à 13 millions de tonnes (MADR, 2021). Le blé dur est la principale culture céréalière économique, représentant 46 % de la production totale et couvrant une superficie de 1,6 million d'hectares (Harrag et Boulfred, 2019). Toutefois, la production nationale ne permet de couvrir que 24 à 55 % de la consommation annuelle, en fonction des conditions climatiques, soit environ 202 kg par habitant et par an (ITGC, 2022). Pour combler ce déficit et répondre à une demande croissante, l'Algérie dépend largement des importations. Elle figure parmi les plus grands importateurs mondiaux de blé dur, avec une moyenne annuelle de 1,53 million de tonnes au cours des cinq dernières années (Hales, 2025). Cette situation s'explique principalement par la forte dépendance du régime alimentaire algérien au blé dur, utilisé sous diverses formes (pain, pâtes, couscous, freekeh, aïch, baghrir, tamina, rechta, etc.), mais aussi par les faibles rendements nationaux, fortement impactés par les conditions climatiques défavorables : précipitations irrégulières et insuffisantes, basses températures hivernales, gelées printanières, sécheresses tardives et vents chauds (sirocco) (Xynias et al., 2020 ; Haddad et al., 2021). À cela s'ajoutent une maîtrise insuffisante des itinéraires techniques agricoles, incluant notamment les pratiques culturales et la gestion de la récolte (Di Mola et al., 2021).

La récolte du blé dur représente une étape cruciale du système de production, car elle a un impact direct sur le rendement en grains et leur qualité finale. Chaque année, un écart significatif est observé entre les rendements potentiels et ceux effectivement récoltés, en raison de pertes importantes avant et pendant la récolte, estimées à 20 % pour les cultures céréalières

CHAPITRE IV : MODELISATION DES PERTES DE RENDEMENT ET EVALUATION DE LA QUALITE DE GENOTYPES DE BLE DUR EN ZONE SEMI-ARIDE

(Gustavsson et al., 2011 ; Lipinski et al., 2013). Récolter à un taux d'humidité optimal permet de réduire ces pertes, tandis qu'un retard après la maturité physiologique entraîne des altérations indésirables de la qualité technologique du blé dur (Forster et al., 2016). Un retard excessif impacte négativement la qualité du grain récolté et peut influencer les conditions de stockage (Deliberali et al., 2010). Selon Gan et al. (2000), un retard de récolte au-delà de la maturité du grain entraîne une diminution du poids spécifique du blé dur. Il n'est donc pas nécessaire d'attendre un assèchement total des tiges, car cela entraîne une perte de poids, une diminution de la matière sèche et expose la culture au risque de précipitations, favorisant ainsi la formation de grains mitadinés.

L'une des stratégies d'amélioration de la qualité des grains repose sur une récolte précoce. Toutefois, l'agriculteur doit prendre en compte plusieurs paramètres, notamment les besoins et la disponibilité en moyens de séchage, le risque de détérioration du grain et l'énergie nécessaire au séchage (Embrapa, 2011 ; Alt, 2018). Récolter juste après la maturation physiologique peut constituer une alternative efficace pour garantir une qualité industrielle optimale, en préservant des niveaux élevés d'amidon, de protéines et d'humidité, tout en réduisant l'exposition aux maladies fongiques (Paul et Lindsey, 2014).

Les pertes à la récolte du blé dur, souvent d'origine mécanique, diminuent les rendements réels par rapport aux rendements estimés. Celles causées par les moissonneuses-batteuses sont particulièrement importantes. Bien que ces machines aient considérablement amélioré l'efficacité de la récolte, une mauvaise utilisation ou un mauvais réglage peut entraîner des pertes de grains pouvant dépasser 10 % du rendement potentiel (Ali & Jabara, 2021). Le manque de compétence technique des opérateurs peut aggraver ces dysfonctionnements (Wang et al., 2021 ; Tihanov et al., 2021). Ainsi, une moissonneuse-batteuse mal calibrée peut compromettre une partie importante de la récolte. Cela souligne l'importance d'ajuster les paramètres de récolte et de former adéquatement les opérateurs pour minimiser les pertes et maximiser la rentabilité de la culture du blé dur.

Cette étude vise à analyser les paramètres de qualité technologique de trois génotypes de blé dur cultivés en conditions semi-arides et à évaluer l'efficacité de l'utilisation du modèle mathématique reliant le rendement en grains à l'humidité du grain, Afin d'estimer les pertes de rendement liées, d'une part, à un retard dans la récolte, et d'autre part, aux pertes mécaniques occasionnées par la moissonneuse-batteuse.

CHAPITRE IV : MODELISATION DES PERTES DE RENDEMENT ET EVALUATION DE LA QUALITE DE GENOTYPES DE BLE DUR EN ZONE SEMI-ARIDE

MATERIELS ET METHODES :

1. Matériel végétal et site expérimentale

L'expérimentation a été menée durant deux campagnes agricole 2020- 21 et 2021-22, dans trois zones agroécologiquement différentes appartenant à l'étage bioclimatique semi-aride et représentant les régions : la station expérimentale de l'ITGC à Sétif ($36^{\circ} 08'22''N$. $5^{\circ}20'55''E$, 973 m amsl, Algérie), Celui de Ain Oulmène est situé environ 34 km au sud de la wilaya de Sétif ($35^{\circ} 55'30''N$. $5^{\circ} 22'07''E$, 934 m amsl, Algérie) et le site expérimental de Béni Fouda a été mis à notre disposition par l'Exploitation Agricole Collective "Dahal Nouari", ($36^{\circ}15'08''N$, $5^{\circ}29'43''E$, 1199 m amsl, Algérie). Le matériel végétal utilisé est composé de trois génotypes de blé dur (*Triticum durum* Desf.) : Boussellam (BOS), Oued El Bared (OB) et GTA dur (GTA), semés à un dispositif en blocs complètement randomisés avec trois répétitions. La densité de semis a été ajustée à 300 graines/ m^2 .

2. Mesures agronomiques et technologiques

Les mesures ont été effectuées du début de la maturation physiologique des grains jusqu'au jour de la récolte mécanique. Des échantillons ont été prélevés cinq fois dans un intervalle de 13 jours après la maturation physiologique Afin d'évaluer l'effet de la dégradation de l'humidité des grains sur le rendement et les paramètres technologiques du grain de blé dur.

2.1 Paramètres agronomiques

Le rendement en grains (RDT q.h⁻¹) a été estimé au moment de la récolte. Les échantillons de grains ont été récoltés manuellement sur une surface de 1 m² pour chaque répétition, puis convertis en quintaux par hectare. L'humidité des grains au champs (HC %) a été mesurée à l'aide d'un humidimètre portable de type "*Riceter f 508*", qui fournit directement le taux d'humidité du grain en pourcentage (%).

2.2 Paramètres technologiques

Les analyses de qualité ont été réalisées après la récolte et ont porté sur plusieurs paramètres. Ces mesures ont été effectuées à l'aide d'un appareil de type "*NIR Inframatic 9500 Results Plus*", qu'il fonctionne dans une plage de longueurs d'onde comprise entre 850 et 1050 nm. Cette plage du proche infrarouge (NIR) permet une analyse rapide et non destructive de la composition des grains, notamment pour mesurer :

2.2.1 Teneur en protéines (TP %)

La teneur en protéines des grains correspond à la proportion de protéines contenue

CHAPITRE IV : MODELISATION DES PERTES DE RENDEMENT ET EVALUATION DE LA QUALITE DE GENOTYPES DE BLE DUR EN ZONE SEMI-ARIDE

dans le grain, exprimée en pourcentage (%). Il est un indicateur clé de la valeur nutritionnelle et de la qualité technologique du blé, notamment pour la fabrication des pâtes et du pain.

2.2.2 Taux de grains non vitreux (Mitadinage %)

Le taux de grains non vitreux représente la proportion de grains présentant une texture farineuse et opaque, par opposition aux grains vitreux, plus denses et translucides. Un taux élevé de mitadinage est généralement associé à une baisse de la qualité technologique du blé dur, notamment pour la fabrication des pâtes alimentaires.

2.2.3 Poids spécifique (PS Kg. hL⁻¹)

Le poids spécifique correspond au poids d'un volume donné de grains, généralement exprimé en kilogrammes par hectolitre (kg/hL). Il est un indicateur clé de la densité et de la qualité du grain, influençant son rendement en semoule et son aptitude à la transformation industrielle.

2.2.4 Taux d'humidité en laboratoire (HIAB %)

Le taux d'humidité du grain représente la quantité d'eau contenue dans le grain, exprimée en pourcentage (%). Il est un facteur déterminant pour la qualité de conservation, le rendement en transformation et la réduction des pertes post-récolte.

3. Evaluation de la performance du modèle de prédiction

Pour évaluer les pertes de rendement en grains dues à la dégradation de l'humidité au moment de la récolte, un modèle de régression linéaire a été utilisé. Afin d'évaluer la performance de ce modèle, les indices suivantes ont été adoptés :

3.1 Erreur Absolue Moyenne (EAM)

L'erreur absolue moyenne mesure la magnitude moyenne pondérée des erreurs absolues (écart moyen entre les valeurs prédictes et les valeurs réelles) et peut être calculée à l'aide de l'équation suivante (1) (Willmott & Matsuura, 2005) :

$$EAM = \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - S_i|}{N} \quad (1)$$

CHAPITRE IV : MODELISATION DES PERTES DE RENDEMENT ET EVALUATION DE LA QUALITE DE GENOTYPES DE BLE DUR EN ZONE SEMI-ARIDE

3.2 Erreur Quadratique Moyenne (EQM)

L'erreur quadratique moyenne exprime la variation pondérée des erreurs (résidus) entre les valeurs simulées et observées. Plus les valeurs de EAM et EQM sont proches de 0, plus le modèle est précis. Le EQM est calculé selon l'équation (2) (Willmott & Matsuura, 2005).

$$EQM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{N}} \quad (2)$$

3.3 Indice d'accord (D)

L'indice d'accord permet de détecter les différences additives et proportionnelles entre les moyennes observées et simulées. Une valeur de 1 indique une correspondance parfaite, tandis qu'une valeur de 0 signifie une absence totale d'accord. Il est calculé selon l'équation (3) de Willmott et *al.* (1985) :

$$D = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|S_i - MO| + |O_i - MO|)^2} \quad (3)$$

3.4 Coefficient d'efficacité (E)

Le coefficient d'efficacité mesure l'écart global entre les valeurs observées et simulées, par rapport à l'écart global entre les valeurs observées (O_i) et leur moyenne (MO). Il est sans unité et varie de $-\infty$ à $+1$, une valeur proche de $+1$ indiquant une meilleure performance du modèle. Il est calculé selon l'équation (4) de Yan et *al.* (2015) :

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - MO)^2} \quad (4)$$

3.5 Coefficient de corrélation (r)

Le coefficient de corrélation mesure le degré de proximité entre les valeurs observées et les valeurs estimées par le modèle. Plus r est proche de 1, plus la corrélation entre les valeurs observées et simulées est forte. À l'inverse, si les valeurs observées et prédictes sont totalement indépendantes (absence de corrélation), alors $r = 0$. Le coefficient de corrélation est calculé selon l'équation (5).

CHAPITRE IV : MODELISATION DES PERTES DE RENDEMENT ET EVALUATION DE LA QUALITE DE GENOTYPES DE BLE DUR EN ZONE SEMI-ARIDE

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - MO)(S_i - MS)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - MO)^2 \sum_{i=1}^n (S_i - MS)^2}} \quad (5)$$

Où :

- **S_i** = valeur simulée
- **O_i** = valeur observée
- **N** = nombre d'observations
- **MS** = moyenne des valeurs simulées
- **MO** = moyenne des valeurs observées

4. Analyse des pertes de rendement liées à la moissonneuse-batteuse

Avant la récolte, un dispositif collecteur a été installé à l'arrière de la moissonneuse-batteuse. Ce système, déclenché à l'aide d'une télécommande lorsque la machine atteint le centre de la parcelle de récolte, libère un plateau au sol qui recueille les résidus, notamment la paille et les grains perdus après le battage (Figure 22).

L'opération a été répétée dix fois pour garantir un échantillonnage représentatif. Les grains récupérés ont été triés manuellement, puis pesés avec une balance de précision. L'estimation des pertes a été effectuée grâce à l'application « *Feiffer Grain* » (Wilmer, 2019), liée au dispositif, qui calcule les pertes en kg.h⁻¹. Les paramètres saisis incluent : le poids des grains perdus, le type de culture (blé dur), le PMG, le rendement estimé, ainsi que les largeurs de l'andain et de la barre de coupe. Cette méthode permet une évaluation fiable et précise des pertes mécaniques lors de la récolte (code QR Figure 22).



Figure 22: Outil d'estimation des pertes de la moissonneuse batteuse.

CHAPITRE IV : MODELISATION DES PERTES DE RENDEMENT ET EVALUATION DE LA QUALITE DE GENOTYPES DE BLE DUR EN ZONE SEMI-ARIDE

5. Analyse statistique

Une analyse de variance à un facteur (ANOVA) a été utilisée pour évaluer les différences entre les génotypes. Les moyennes ont été comparées à l'aide du test *LSD* de Fisher, en utilisant le logiciel CoStat (version 6.4). Les indices statistiques de validation de modèles ont été calculé avec RStudio Team, utilisant R version 4.5.0.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

L'analyse de la variance a révélé des effets significatifs du génotype, du site et de l'année sur l'ensemble des paramètres technologiques. En revanche, aucun effet significatif du génotype n'a été observé sur le rendement en grain (Tableau 22).

Tableau 22: Carrés moyens de l'analyse de la variance du rendement et des variables technologiques.

Source de variation	df	RDT	HC	Hlab	TP	PS	TMD
Génotype	2	20,09 ^{ns}	11.27**	1.72*	20.66***	66.40***	25.57**
Site	2	844,18***	8.37*	3.04**	37.98***	18.98***	1290.96***
Année	1	41,07*	137.15***	120.90***	79.45***	727.47***	1451.85***
Génotype x Site	4	32,16**	4.69 ^{ns}	2.65***	2.25***	4.25***	31.07***
Génotype x Année	2	156,22***	4.93 ^{ns}	2.11**	6.66***	22.36***	20.24*
Site x Année	2	466,30***	0.08 ^{ns}	1.19 ^{ns}	0.53*	23.44***	389.85***
G x S x A	4	16,98 ^{ns}	4.00 ^{ns}	2.93***	0.24 ^{ns}	2.66***	73.41***
Erreur	34	8,18	1.94	0.39	0.11	0.13	4.67

RDT : Rendement en grain, HC : Humidité des grains au champs, Hlab : Taux d'humidité en laboratoire, TP : Teneur en protéine, PS : Poids spécifique, TMD : Taux du mitadinage.

1. Rendement en grain (RDT)

L'analyse de variance ANOVA révèle que le RDT est fortement influencé par le site ($p<0,001$) et l'année ($p<0,05$), avec des effets très hautement significatifs. En plus, les interactions Génotype x Site, Génotype x Année, et Site x Année sont significatives, (Tableau 22).

A Ain Oulmène, En 2020-2021, le génotype BOS a enregistré le rendement le plus élevé ($26,09 \text{ q.h}^{-1}$) par rapport aux GTA dur et OB ($23,14$ et $22,91 \text{ q.h}^{-1}$) (Tableau 23). En 2021-2022, le rendement a augmenté pour OB et GTA dur, BOS a légèrement diminué ($24,61 \text{ q.h}^{-1}$). Le génotype GTA dur a montré une nette amélioration ($28,70 \text{ q.h}^{-1}$), devenant ainsi le plus productif. La moyenne des rendements a évolué de $24,05 \text{ q.h}^{-1}$ en 2020-2021 à $26,19 \text{ q.h}^{-1}$ en

CHAPITRE IV : MODELISATION DES PERTES DE RENDEMENT ET EVALUATION DE LA QUALITE DE GENOTYPES DE BLE DUR EN ZONE SEMI-ARIDE

2021-2022, indiquant une augmentation globale significative ($p<0,05$) du rendement de +8,90%.

A l'ITGC, en 2020-21, les génotype BOS et OB avaient les rendements les plus élevés (26,77 et 25,97 q.h⁻¹, respectivement) GTA dur se démarqué moins productif (19,56 q.h⁻¹). En 2021-22, tous les génotypes ont vu leur rendement augmenter, avec une forte progression pour GTA dur (40,14 q. ha⁻¹) et OB AO (39,21 q.h⁻¹). La moyenne du rendement a augmenté de 24,10 q.h⁻¹ en 2020-2021 à 35,82 q.h⁻¹ en 2021-2022, soit une hausse de +48,63%.

A Beni Fouda, en 2020-21, BOS et GTA dur ont donné les meilleurs rendements (44,69 et 43,44 q.h⁻¹, respectivement), tandis que OB a produit moins avec 40,72 q.h⁻¹. En 2021-2022, tous les génotypes ont enregistré une baisse du rendement. GTA dur est devenu le plus performant avec 39,36 q.h⁻¹, tandis que BOS et OB sont révélé statistiquement similaires avec (31,63 et 31,98 q.h⁻¹, respectivement). Une diminution significative ($p<0,05$) en 2021-22 représente une baisse de 20,09% comparée à la saison précédente. Toutefois, Beni Fouda reste la région la plus productive, avec un rendement moyen de 38,63 q.h⁻¹, supérieur à l'ITGC et Ain Oulmène de 22,44 et 35%, respectivement.

Ces résultats confirment l'influence prépondérante des conditions environnementales sur le rendement en grain. Le site apparaît comme le facteur déterminant, traduisant l'effet combiné du climat, du sol et des pratiques culturales. De plus, l'interaction significative entre les génotypes et les sites souligne l'importance d'adapter le choix variétal aux spécificités agroécologiques des régions Afin d'optimiser la production.

2. Humidité des grains au champs (HC %)

Une différence inter-variétale très significative ($p<0,01$) a été observée pour la teneur en humidité des grains au champ. Le génotype OB a enregistré la valeur minimale (9%) à Aïn Oulmène lors de la campagne 2020-21, tandis que la valeur maximale a été notée pour BOS (9,3%). La moyenne générale est passée de 9,19% durant la première campagne à 12,48% lors de la seconde (2021-22). Durant cette dernière, le génotype GTA dur a perdu davantage d'humidité, avec une teneur de 11,77%, contrairement à BOS qui a su maintenir un taux d'humidité plus stable au champ, atteignant 13,5% (Tableau 23).

À l'ITGC, le génotype GTA dur a présenté la plus faible teneur en humidité des grains avec 9,33 % en 2020-21, tandis qu'aucune différence significative n'a été observée entre BOS et OB. Lors de la deuxième campagne, la moyenne générale a augmenté pour atteindre 13,01

CHAPITRE IV : MODELISATION DES PERTES DE RENDEMENT ET EVALUATION DE LA QUALITE DE GENOTYPES DE BLE DUR EN ZONE SEMI-ARIDE

%. Le génotype OB a enregistré la valeur maximale (13,98 %), sans différence significative avec BOS (12,5 %) ni avec GTA dur (12,65 %).

À Béni Fouda, durant la première saison, la moyenne génotypique de l'humidité des grains au champ a atteint 10,58 %, avec une valeur maximale pour BOS (11,33 %), tandis qu'OB a montré une perte d'humidité plus marquée (10 %). Lors de la seconde saison, une augmentation très hautement significative ($p<0,001$) a été observée, la moyenne générale atteignant 13,82 %. Dans ces conditions, le génotype Boussellam s'est montré plus tolérant aux pertes d'humidité avec un taux élevé de 16,38 %, alors que GTA dur a enregistré la plus faible valeur avec 10,52 %.

L'humidité optimale pour la récolte du blé dur se situe entre 15 et 18%, puis les grains doivent être séchés et stockés à 13% d'humidité (Alt et al., 2019). La teneur en humidité des grains influence le moment de la récolte et le processus de séchage (Maiorano et al., 2014). Lorsque les agriculteurs disposent d'un séchoir à air chaud, la récolte peut commencer lorsque la teneur en humidité atteint 18% (Metz, 2006).

En Algérie, en raison de l'absence de séchage artificiel, la récolte du blé dur débute généralement lorsque la teneur en humidité des grains est d'environ 13% et se poursuit jusqu'à atteindre 9%. Ce processus coïncide avec des températures élevées et l'insuffisance de moissonneuses-batteuses, ce qui peut entraîner des retards dans la récolte. Ces retards augmentent la vulnérabilité des cultures aux conditions de sécheresse et aux pertes d'humidité, réduisant ainsi le rendement en grain.

3. Paramètres technologiques

3.1 Teneur en protéines (TP %)

La teneur en protéines des grains présente des différences très hautement significatives ($p<0,001$) entre les génotypes testés (Tableau 22). À Ain Oulmène, lors de la campagne 2020-21, cette teneur variait de 15,03% pour OB à 17,13% pour BOS (Tableau 23). Lors de la seconde campagne, une augmentation significative a été observée, avec des valeurs comprises entre 17,6% pour OB et 20,8% pour BOS. À l'ITGC, le génotype BOS a enregistré les teneurs maximales en protéines au cours des deux campagnes agricoles, avec 15,87% en 2020-21 et 19% en 2021-22. En revanche, les teneurs les plus faibles ont été observées chez GTA dur, avec 14,3% lors de la première saison et 15,6% lors de la seconde.

CHAPITRE IV : MODELISATION DES PERTES DE RENDEMENT ET EVALUATION DE LA QUALITE DE GENOTYPES DE BLE DUR EN ZONE SEMI-ARIDE

À Béni Fouda, les teneurs en protéines ont varié de 13,27 % à 13,43 % lors de la première campagne, avec une moyenne générale de 13,3 %. La valeur minimale a été observée chez le génotype GTA dur. Une augmentation significative a été enregistrée lors de la seconde campagne, atteignant une moyenne de 15,96 %, avec BOS affichant les teneurs les plus élevées (17,9%).

Ces résultats confirment que la teneur en protéines des grains varie significativement selon le génotype et les conditions agro-climatiques, comme observé à travers les trois sites d'expérimentation. Le génotype BOS s'est distingué par ses performances supérieures en matière de teneur en protéines, ce qui reflète un potentiel génétique intéressant pour la sélection variétale. À l'inverse, GTA dur a présenté les valeurs les plus faibles, démontrant une sensibilité plus marquée à la variabilité des conditions environnementales.

Cette variabilité inter-génotypique souligne l'existence d'une diversité génétique importante au sein des génotypes étudiés. Elle corrobore les travaux antérieurs qui attribuent la richesse en protéines de l'endosperme à l'expression de plusieurs gènes régulateurs, influencés par les interactions génotype-environnement (Shewry et Halford, 2002). Selon Serra et *al*, (2021), chaque génotype possède un spectre d'allèles spécifique qui détermine non seulement la quantité mais aussi la qualité des protéines accumulées dans le grain.

3.2 Poids spécifique (PS Kg.hL⁻¹)

Les résultats de l'analyse de la variance démontrent que le poids spécifique est fortement influencé par des facteurs génétiques (génotypes), environnementaux (sites et années), ainsi que par leurs interactions (Tableau 22). Cette très haute significativité ($p<0,001$) montre une variabilité marquée entre les génotypes selon les conditions agro-climatiques. Ces résultats soulignent l'importance d'adapter les variétés aux milieux spécifiques pour optimiser la qualité technologique des grains. Le poids spécifique peut ainsi servir de critère pertinent dans les programmes de sélection variétale, notamment dans le contexte du changement climatique et de la recherche de stabilité des performances. À Ain Oulmène, durant la campagne 2020-21, la moyenne générale du poids spécifique a atteint 81,18 Kg.hL⁻¹. Le génotype OB a présenté la valeur la plus faible (80,43 Kg.hL⁻¹), tandis que BOS a affiché la valeur maximale (81,8 Kg.hL⁻¹). Lors de la campagne 2021-22, une baisse significative a été observée, avec une moyenne générale de 74,96 Kg.hL⁻¹. Le poids spécifique le plus faible a été relevé chez OB, avec 73,37 Kg.hL⁻¹ (Tableau 23). A l'ITGC, la moyenne de poids spécifique a varié respectivement entre 81,19 à 71,22 Kg.hL⁻¹ de la première saison à la seconde. À Beni Fouda, les moyennes ont changé du 79,3 à 73,47 Kg.hL⁻¹. Dans la plupart des pays, le blé dur est commercialisé sur la

CHAPITRE IV : MODELISATION DES PERTES DE RENDEMENT ET EVALUATION DE LA QUALITE DE GENOTYPES DE BLE DUR EN ZONE SEMI-ARIDE

base de ses caractéristiques physiques, définies par des systèmes de classification tels que le poids spécifique (Forster, 2016). Par ailleurs, les dimensions du grain, ainsi que la taille du caryopse, constituent des facteurs essentiels influençant le rendement en semoule. À l'échelle réglementaire, les moyennes générales du poids spécifique varient de 75 Kg.hL^{-1} pour Oued El Bared qui satisfait aux exigences du 3^{ème} degré des systèmes de classification canadiens (CGC) et du 2^{ème} degré des classifications américaines (GIPSA), $76,80 \text{ Kg.hL}^{-1}$ pour Boussellam (3^{ème} classe CGC, 1^{ère} classe GIPSA) à $78,84 \text{ Kg.hL}^{-1}$ pour GTA dur, qui satisfait aux exigences du 2^{ème} degré des systèmes de classification canadiens et du 1er degré des classifications américaines (CGC, 2021 ; GIPSA 2020).

3.3 Taux de grains non vitreux « Mitadinage » (TMD%)

Le taux de mitadinage représente la proportion de grains non vitreux (farineux et opaques) dans un échantillon de blé dur. Un taux élevé peut réduire le rendement en semoule et affecter la qualité des produits transformés.

Le taux de mitadinage a révélé des différences très significatives ($p<0,01$) entre les génotypes étudiés. À Ain Oulmène, une sensibilité variable au phénomène de perte de vitrosité des grains a été observée, lors de la campagne 2020-21, le génotype OB a montré le taux de mitadinage le plus élevé (25 %), indiquant une forte proportion de grains non vitreux, tandis que BOS a affiché le taux le plus bas avec 18,67 %. En 2021-22, une évolution contrastée a été notée, BOS a maintenu une proportion de grains mitadins de 23,67 %, tandis que GTA a enregistré une nette amélioration avec un taux de seulement 11 %, soit la valeur la plus faible de cette campagne. Ces résultats témoignent de l'effet combiné du génotype et des conditions environnementales sur la vitrosité des grains.

La moyenne génotypique des grains mitadins enregistrée à l'ITGC en 2020-21 était relativement faible, atteignant 5,44 %, alors qu'en 2021-22, elle n'a été que de 0,11 %. À Beni Fouda, lors de la première campagne, la moyenne générale des grains mitadins a atteint 22,89 %. OB a enregistré les valeurs maximales avec 25 %, sans différence significative par rapport à BOS et GTA dur. En revanche, lors de la deuxième campagne, une baisse très significative a été observée, avec un taux de mitadinage chutant à 1,78 %, ce qui indique que les génotypes ont développé une meilleure tolérance au mitadinage.

Selon Kahraman et Gökmen, (2023), les températures élevées pendant la période critique (montaison à maturité) ont affecté positivement la vitrosité, le taux de protéines et la couleur de la semoule, mais négativement le poids spécifique.

CHAPITRE IV : MODELISATION DES PERTES DE RENDEMENT ET EVALUATION DE LA QUALITE DE GENOTYPES DE BLE DUR EN ZONE SEMI-ARIDE

Cependant, d'après Tilley et *al.*, (2012) qui ont défini la vitrosité du blé dur comme étant élevée (au-dessus de 75%), moyenne (entre 60 et 75%) et faible (en dessous de 60%). Annicchiarico et *al.*, (2006) affirment que le blé dur fait face à un manque de stabilité de la qualité technologique et commerciale, dû notamment aux variations de critères importants tels que les grains non vitreux (pénalisant la valeur de la semoule) et les points noirs.

En effet, dans le blé dur, la relation entre la teneur en mitadinage et la performance de mouture est complexe, mais on peut dire qu'en général, les grains amyloacés (contiennent davantage d'amidon et moins de protéines) donnent une semoule moins grossière et plus de farine, ce qui réduit leur capacité à être moulus (Heinze et *al.*, 2016).

CHAPITRE IV : MODELISATION DES PERTES DE RENDEMENT ET EVALUATION DE LA QUALITE DE GENOTYPES DE BLE DUR EN ZONE SEMI-ARIDE

Tableau 23: Comparaison des moyennes des variables agronomiques sur deux saisons et trois sites.

Site		AO											
Paramètres		RDT		HC		Hlab		TP		PS		TMD	
Génotypes	Saisons	20-21	21-22	20-21	21-22	20-21	21-22	20-21	21-22	20-21	21-22	20-21	21-22
BOS AO		26,09 ^a	24,61 ^b	9,3 ^a	13,5 ^a	8,4 ^c	12,23 ^a	17,13 ^a	20,8 ^a	81,8 ^a	74,63 ^b	18,67 ^a	23,67 ^a
OB AO		22,91 ^b	25,25 ^b	9 ^b	12,17 ^a	8,63 ^a	12,17 ^a	15,03 ^c	17,6 ^c	80,43 ^c	73,37 ^c	25 ^a	17,33 ^b
GTA AO		23,14 ^b	28,70 ^a	9,27 ^a	11,77 ^a	8,5 ^b	11,77 ^a	16,53 ^b	18,07 ^b	81,3 ^b	76,87 ^a	22,33 ^a	11 ^c
Moyenne		24,05	26,19	9,19	12,48	8,51	12,06	16,23	18,82	81,18	74,96	22	17,33
LSD 5%		2,27	3,09	0,22	1,91	0,07	0,81	0,22	0,22	0,31	0,27	6,47	4,89
CV %		4,17	5,20	1,06	6,78	0,39	2,97	0,61	0,51	0,17	0,16	12,99	12,46
Site		ITGC											
Paramètres		RDT		HC		Hlab		TP		PS		TMD	
Génotypes	Saisons	20-21	21-22	20-21	21-22	20-21	21-22	20-21	21-22	20-21	21-22	20-21	21-22
BOS ITGC		26,77 ^a	28,11 ^b	10,3 ^a	12,5 ^a	8,83 ^b	10,97 ^a	15,87 ^a	19 ^a	82,47 ^a	69,97 ^b	10 ^a	0,33 ^a
OB ITGC		25,97 ^a	39,21 ^{ab}	10,3 ^a	13,98 ^a	9,33 ^a	11,73 ^a	15,47 ^a	17,13 ^b	79,43 ^c	69,03 ^b	5,67 ^b	0 ^a
GTA ITGC		19,56 ^b	40,14 ^a	9,33 ^b	12,65 ^a	8,73 ^b	11,77 ^a	14,3 ^b	15,6 ^c	81,67 ^b	74,67 ^a	0,67 ^c	0 ^a
Moyenne		24,10	35,82	9,98	13,01	8,97	11,49	15,21	17,24	81,19	71,22	5,44	0,11
LSD 5%		3,48	11,14	0,71	4,65	0,42	3,01	1,01	0,58	0,56	1,42	4,30	0,76
CV %		6,37	13,72	3,13	15,76	2,09	11,57	2,95	1,49	0,30	0,88	34,90	300
Site		BF											
Paramètres		RDT		HC		Hlab		TP		PS		TMD	
Génotypes	Saisons	20-21	21-22	20-21	21-22	20-21	21-22	20-21	21-22	20-21	21-22	20-21	21-22
BOS BF		44,69 ^a	31,63 ^b	11,33 ^a	16,38 ^a	9,67 ^a	14,53 ^a	13,43 ^a	17,9 ^a	80,57 ^b	71,4 ^b	21,67 ^a	0 ^a
OB BF		40,72 ^b	31,98 ^b	10 ^a	14,54 ^a	9 ^b	12,4 ^{ab}	13,27 ^b	15,43 ^c	76,03 ^c	71,73 ^b	25 ^a	0 ^a
GTA BF		43,44 ^{ab}	39,36 ^a	10,4 ^a	10,52 ^b	9,87 ^a	10,33 ^b	13,2 ^b	14,53 ^c	81,3 ^a	77,27 ^a	22 ^a	5,33 ^a
Moyenne		42,95	34,32	10,58	13,82	9,51	12,42	13,3	15,96	79,3	73,47	22,89	1,78
LSD 5%		2,78	5,48	1,44	3,50	0,64	2,26	0,09	0,67	0,47	1,49	3,66	5,90
CV %		2,86	7,04	6,02	11,18	2,96	8,04	0,31	1,86	0,26	0,90	7,05	146,44

RDT : Rendement en grain, HC : Humidité des grains au champs, Hlab : Taux d'humidité en laboratoire, TP : Teneur en protéine, PS : Poids spécifique, TMD : Taux du mitadinage.

4. Réduction du rendement en grain en fonction de la perte d'humidité des grains

Cinq échantillons ont été prélevés après la maturation physiologique des grains, répartis sur une période de 13 jours, correspondant à cinq dates de récolte (Date 1 à Date 5), Afin d'évaluer le rendement en grain (q.h^{-1}) et la teneur en humidité des grains (%). Une diminution progressive de l'humidité des grains au champs (HC) a été observée de la Date 1 à la Date 5, accompagnée d'une baisse parallèle du rendement en grain (RDT) (Figure 21).

Les teneurs en humidité les plus élevées ont été enregistrées à la Date 1, avec des valeurs supérieures à 16 % pour l'ensemble des génotypes, correspondant aux rendements maximaux de plus de 34 q.h^{-1} à Ain Oulmène et à l'ITGC, et de plus de 40 q.h^{-1} à Beni Fouda. À l'inverse, les teneurs en humidité les plus faibles ont été observées à la Date 5, c'est la période durant laquelle la récolte s'est déroulée dans des conditions de dessèchement avancé, avec des humidités avoisinant les 9 %.

À ce stade, le génotype BOS a perdu respectivement 33,81 % ($11,68 \text{ q.h}^{-1}$), 32,64 % ($11,24 \text{ q.h}^{-1}$) et 20,27 % ($8,16 \text{ q.h}^{-1}$) de son rendement initial à Ain Oulmène, l'ITGC et à Beni Fouda. De son côté, OB a enregistré des pertes de 33,02 % (12 q.h^{-1}), 42,43 % ($16,83 \text{ q.h}^{-1}$) et 26,05 % ($11,1 \text{ q.h}^{-1}$) dans les mêmes sites. Le génotype GTA dur a également subi des pertes importantes, estimées à 34,84 % ($13,1 \text{ q.h}^{-1}$), 34,51 % ($13,19 \text{ q.h}^{-1}$) et 33,80 % ($14,98 \text{ q.h}^{-1}$) de son rendement initial. Selon Parvej et al, (2020), les pertes de rendement en grain peuvent varier en fonction de plusieurs facteurs, tels que la région géographique, les conditions climatiques, le type de blé cultivé, et la durée du retard de récolte. En effet, après la maturation physiologique des grains, chaque jour de retard de récolte entraîne une perte moyenne de rendement de 2,22% ($0,79 \text{ q.h}^{-1}$) pour Boussellam, 2,60% ($1,02 \text{ q.h}^{-1}$) pour Oued El Bared et 2,64% ($1,05 \text{ q.h}^{-1}$) pour GTA dur.

CHAPITRE IV : MODELISATION DES PERTES DE RENDEMENT ET EVALUATION DE LA QUALITE DE GENOTYPES DE BLE DUR EN ZONE SEMI-ARIDE

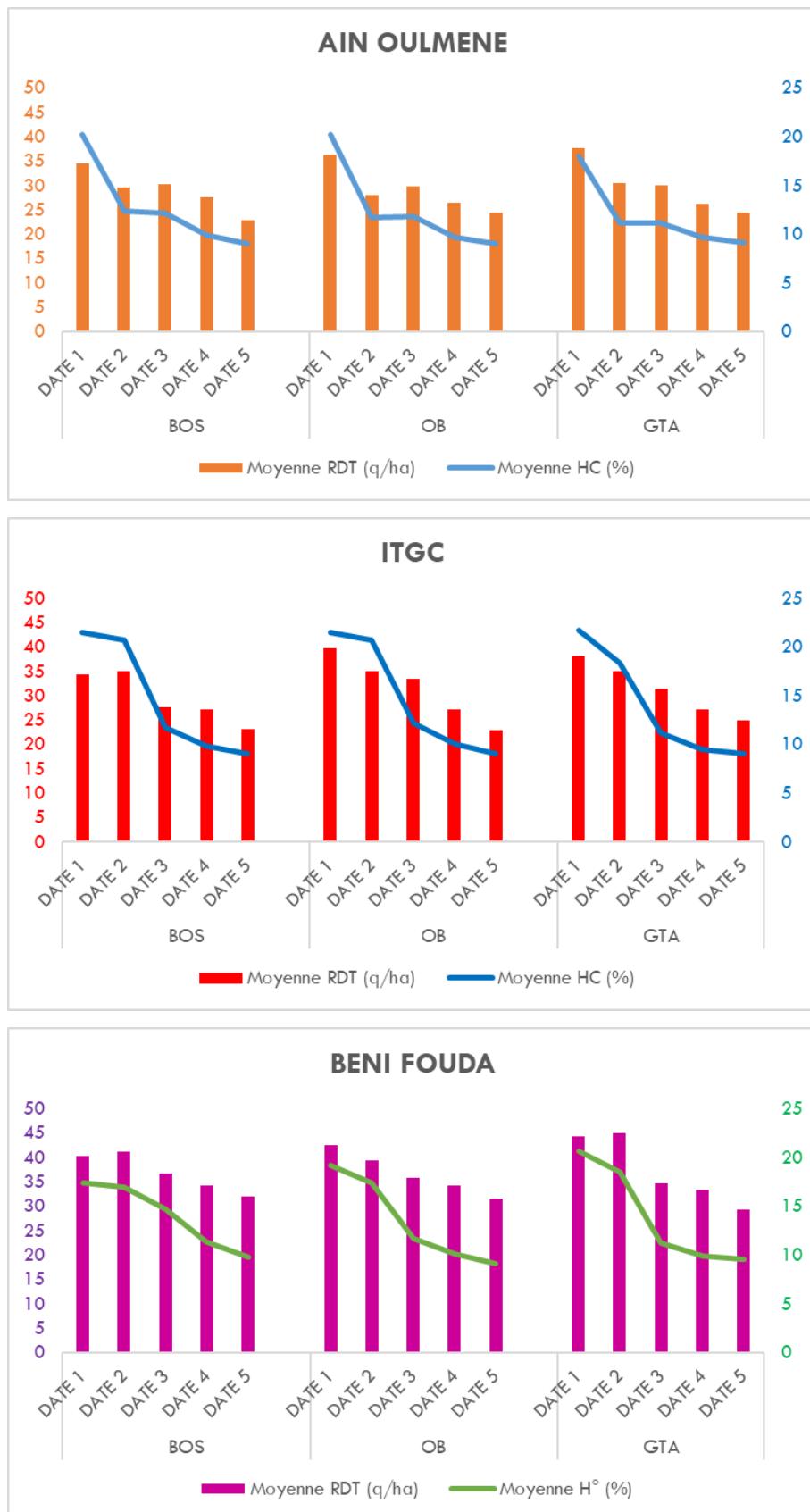


Figure 23: Réduction du rendement en grain en fonction de la perte d'humidité des grains entre la maturation et la récolte au cours des deux campagnes agricoles 2020-21 et 2021-22.

5. Corrélations entre les différents paramètres étudiés

Le tableau 24 montre les résultats de corrélation de l'humidité des grains avec le rendement en grain et les paramètres technologiques durant les deux campagne agricoles 2020-21 et 2021-22. Les résultats ont indiqué qu'il y a des corrélations très hautement significatives et positives ($p<0,001$) entre la teneur en humidité des grains (HC) et le rendement en grain (RDT) avec $r_{20-21}=0,71$ et $r_{21-22}=0,76$, l'humidité au laboratoire (Hlab) est aussi corrélé positivement et très hautement significative avec le RDT ($r_{20-21}=0,64$, $r_{21-22}=0,78$), ces résultats indiquent qu'une diminution de l'humidité des grains après la maturation physiologique est généralement associée à une baisse du rendement en grain. Parvej et *al.*, (2020) ont indiqué que retarder la récolte du blé au-delà de la maturité physiologique des grains peut effectivement entraîner des pertes de rendement, soulignant ainsi l'importance d'une récolte en temps opportun pour maximiser à la fois le rendement et la qualité. Selon Scariot et *al.*, (2018), la gestion de la teneur en humidité des grains par des pratiques efficaces de séchage et de stockage est également essentielle pour réduire les pertes pré et post-récolte.

Une corrélation positive et significative a été observée entre l'humidité des grains estimée par l'humidimètre portable et celle mesurée en laboratoire avec des coefficients de $r_{20-21}=0,97***$ et $r_{21-22}= 0,98***$, respectivement. Ces résultats confirment l'efficacité de l'humidimètre portable pour estimer la dégradation de l'humidité des grains sur le terrain (Tableau 24).

Des corrélations très significatives et négatives ($p<0,01$) entre le taux de mitadinage (TMD) avec l'humidité des grains au champs et celle en laboratoire durant les deux saisons de culture. La maturation physiologique est le moment où le grain de blé dur a atteint son poids sec maximal. Après cette phase, il n'accumule plus de matière sèche, mais continue à perdre de l'eau. Le dessèchement rapide (sécheresse ou chaleur excessive après maturation) peut augmenter le mitadinage car l'amidon se forme mal ou est mal réparti dans l'endosperme (Dziki et Laskowski, 2005). Le stress hydrique avant ou pendant le remplissage des grains, peut entraîner un taux élevé de grains mitadinés, même si l'humidité des grains chute normalement ensuite (Moayedi et *al.*, 2021).

Des corrélations négatives et significatives ($r = -0,65***$ au champ et $r = -0,63***$ en laboratoire) ont été observées entre le poids spécifique et l'humidité des grains en 2021-22. Selon Bayer Crop Science (2021), un bon dessèchement favorise un remplissage optimal, augmentant ainsi la densité et le poids spécifique. À l'inverse, un dessèchement trop rapide peut

CHAPITRE IV : MODELISATION DES PERTES DE RENDEMENT ET EVALUATION DE LA QUALITE DE GENOTYPES DE BLE DUR EN ZONE SEMI-ARIDE

produire des grains moins denses. Le poids spécifique s'améliore donc avec la baisse progressive de l'humidité jusqu'à la maturité.

Des corrélations négatives et significative en 2021-22 entre le rendement en grain avec le poids spécifique $r = -0,46^{**}$ et avec le taux de mitadinage $r = -0,43^{**}$, cette corrélation négative avec le poids spécifique peut s'expliquer par un remplissage des grains plus dense mais moins volumineux, ce qui peut réduire le rendement total (Mecha et al., 2017). De même, un taux élevé de mitadinage pourrait être lié à un stress environnemental en fin de cycle, qui nuisent à la formation complète du grain, et donc au rendement (Amegbor et al., 2022). La corrélation négative entre le rendement en grain et le taux de protéine $r = -0,40^{**}$, signifie qu'un rendement élevé s'accompagne souvent d'une teneur protéique plus faible. Ce phénomène s'explique par la dilution des protéines dans une masse granière plus importante. Il reflète un compromis physiologique entre productivité et qualité. Cette relation complique la sélection variétale et la gestion de la fertilisation azotée (El Sabagh et al., 2021).

Aucune corrélation n'a été observée entre la teneur en eau du grain et la teneur en protéines. Dorrian et al, (2023) ont constaté que la variation de la teneur en protéines en fonction de la date de récolte ne dépassait pas 0,20 %. Ils ont également indiqué que, d'un point de vue physiologique, la teneur en eau ne devrait pas avoir d'effet significatif sur la teneur en protéines, car l'accumulation de protéines est censée atteindre son maximum et se stabiliser à maturité.

Tableau 24: Coefficient de corrélation entre l'humidité des grains, le rendement en grains et les paramètres de qualité.

2021-22	HC	RDT	Hlab	TP	PS	TMD
2020-21						
HC	1	0,76***	0,98***	0,09	-0,65***	-0,42**
RDT	0,71***	1	0,78***	-0,11	-0,46**	-0,43**
Hlab	0,97***	0,64***	1	0,04	-0,63***	-0,42**
TP	-0,18	-0,40**	-0,15	1	-0,01	0,19
PS	0,14	-0,06	0,10	0,24	1	0,20
TMD	-0,44**	0,03	-0,46**	-0,29	-0,28	1

RDT : Rendement en grain, HC : Humidité des grains au champs, Hlab : Taux d'humidité en laboratoire, TP : Teneur en protéine, PS : Poids spécifique, TMD : Taux du mitadinage.

6. Estimation des pertes de rendement en grain en fonction de l'humidité du grain.

La Figure 22A illustre la relation entre l'humidité des grains au champ (HC) et le rendement en grains (RDT). Établie à partir des moyennes des deux saisons de culture 2020-21 et 2021-22, couvrant l'ensemble des 45 traitements, un modèle a été établi pour estimer et

CHAPITRE IV : MODELISATION DES PERTES DE RENDEMENT ET EVALUATION DE LA QUALITE DE GENOTYPES DE BLE DUR EN ZONE SEMI-ARIDE

prédirer les pertes de rendement en fonction de l'humidité des grains. Les résultats révèlent une corrélation très hautement significative entre les deux variables ($r = 0,78^{***}$; $p < 0,001$). Le modèle de régression linéaire montre que 61% de la variation du rendement en grains peut être expliquée par les variations de l'humidité des grains. L'équation de régression (6) indique qu'après la maturité physiologique des grains, chaque diminution de 1% de l'humidité des grains entraîne une perte moyenne de $1,0151 \text{ q.h}^{-1}$ de rendement en grain.

$$RDT (\text{q.h}^{-1}) = 1,0151 \times HC (\%) + 18,613 \quad (6)$$

7. Évaluation de la performance du modèle

Pour évaluer la qualité des prédictions de rendement par le modèle linéaire proposé, plusieurs critères ont été calculés : l'erreur absolue moyenne (EAM), l'erreur quadratique moyenne (EQM), l'indice d'accord (D), le coefficient d'efficacité (E), le coefficient de corrélation (r) et le T-test de Student. Les rendements observés et simulés sont fortement corrélés, avec un coefficient de corrélation $r = 0,79$, une pente de 0,62 et un indice d'accord D de 0,87 (Tableau 25, Figure 22B), ce qui indique que le modèle explique 62% de la relation entre les rendements observés et simulés du blé dur, avec un accord (D) de 87%. La bonne concordance entre les valeurs mesurées et simulées est également reflétée dans les analyses statistiques, avec une faible erreur absolue moyenne et une faible erreur quadratique moyenne. Le rendement simulé correspond bien au rendement observé, avec un coefficient d'efficacité (E) de 0,62, ce qui indique une capacité de simulation de 62 %.

CHAPITRE IV : MODELISATION DES PERTES DE RENDEMENT ET EVALUATION DE LA QUALITE DE GENOTYPES DE BLE DUR EN ZONE SEMI-ARIDE

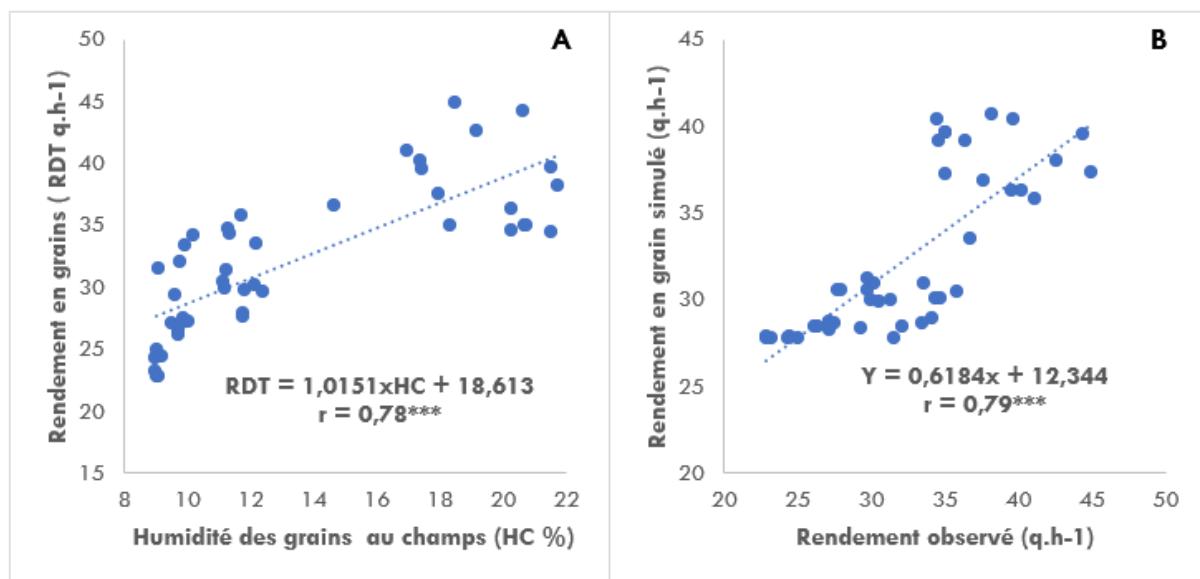


Figure 24: Régression linéaire entre l'humidité des grains au champ (HC) et le rendement en grains (RDT) en (A), rendement en grains observé et simulé en (B).

Tableau 25: Indices statistiques pour évaluer la performance du modèle de régression dans la prédiction du rendement en grain.

Traitements	HC (%)	RDT (q.h ⁻¹)	
		Observé	Simulé
1	20,27	34,55	39,19
2	12,40	29,69	31,20
3	12,15	30,21	30,95
4	9,88	27,51	28,65
5	9,03	22,87	27,78
6	20,25	36,34	39,17
7	11,73	27,95	30,52
8	11,78	29,78	30,57
9	9,70	26,41	28,46
10	9,00	24,34	27,75
11	17,95	37,60	36,83
12	11,12	30,48	29,90
13	11,18	29,97	29,97
14	9,70	26,19	28,46
15	9,17	24,49	27,92
16	21,50	34,44	40,44
17	20,72	34,99	39,64
18	11,75	27,71	30,54
19	9,82	27,16	28,58
20	9,00	23,20	27,75
21	21,52	39,66	40,45
22	20,68	34,99	39,61
23	12,18	33,56	30,98
24	10,00	27,20	28,76
25	9,10	22,83	27,85
26	21,73	38,21	40,67

CHAPITRE IV : MODELISATION DES PERTES DE RENDEMENT ET EVALUATION DE LA QUALITE DE GENOTYPES DE BLE DUR EN ZONE SEMI-ARIDE

27	18,33	35,03	37,21
28	11,23	31,36	30,01
29	9,50	27,10	28,26
30	9,02	25,02	27,76
31	17,38	40,25	36,26
32	16,94	41,10	35,81
33	14,67	36,67	33,50
34	11,35	34,30	30,13
35	9,75	32,09	28,51
36	19,15	42,61	38,05
37	17,41	39,52	36,28
38	11,71	35,78	30,49
39	10,16	34,16	28,92
40	9,08	31,52	27,83
41	20,62	44,32	39,54
42	18,48	44,95	37,37
43	11,28	34,70	30,06
44	9,90	33,43	28,66
45	9,59	29,33	28,34
EAM		D	E
3,12 q.h ⁻¹		0,87	0,62
EQM			
3,57 q.h ⁻¹			
		T-test	r
		-0,001 ; <i>p</i> =0,99	0,79***

EAM : erreur absolue moyenne ; *EQM* : erreur quadratique moyenne ; *D* : indice d'accord ; *T-test* : test de Student ; *r* : coefficient de corrélation.

Le *test de Student* a montré que le rendement en grain simulé ne différait pas significativement ($p=0,99 > 0,05$) du rendement observé, avec une erreur quadratique moyenne (EQM) de 3,57 q.h⁻¹ et une erreur absolue moyenne (EAM) de 3,12 q.h⁻¹ (Tableau 25). Leng et Hall (2020) ont utilisé un modèle de régression pour simuler l'évolution historique du rendement du maïs à partir d'observations, obtenant un coefficient de corrélation $r = 0,51^*$ et un EQM de 7,52. Dans notre étude, les valeurs de EQM et EAM exprimées en pourcentage du rendement moyen observé étaient respectivement de 11,04% et 9,64%. L'écart global entre les rendements simulé et observé était 0,002%, ce qui traduit une très bonne concordance. La performance du modèle, mesurée par le EQM, a été estimée à 88,96%, et la précision basée sur l'EAM à 90,36%. Ces résultats indiquent une grande fiabilité du modèle pour prédire le rendement en grain en conditions semi-arides, surpassant les performances rapportées par Mkhabela et al, (2011), dont le modèle expliquait entre 47 et 80 % de la variabilité du rendement du blé de printemps, avec un EQM représentant de 6 à 34 % du rendement moyen.

8. Pertes quantitatives due à la moissonneuse batteuse

La figure 23 illustre les pertes occasionnées par la moissonneuse-batteuse lors du processus de récolte. Une variation marquée entre les deux campagnes est observée. En 2020-

CHAPITRE IV : MODELISATION DES PERTES DE RENDEMENT ET EVALUATION DE LA QUALITE DE GENOTYPES DE BLE DUR EN ZONE SEMI-ARIDE

21, la moyenne des pertes sur les trois sites était de $98,53 \text{ kg.h}^{-1}$. Ces pertes étaient relativement élevées pour l'ensemble des génotypes et des sites, atteignant jusqu'à $185,51 \text{ kg.h}^{-1}$ pour la variété GTA dur sur le site ITGC, bien que les pertes minimales aient été enregistrées à Beni Fouda. En revanche, la campagne 2021-22 a montré une réduction notable des pertes, qui sont tombées à $44,30 \text{ kg.h}^{-1}$, avec des valeurs aussi faibles que $6,61 \text{ kg.h}^{-1}$ pour la variété OB sur le site ITGC. Cette baisse globale des pertes reflète une amélioration significative du processus de récolte, probablement en raison d'une meilleure calibration des moissonneuses-batteuses. Cependant, certaines situations, comme au site AO pour la variété OB ($88,88 \text{ kg.h}^{-1}$ en 2021-22), suggèrent qu'il existe encore des possibilités d'optimisation.

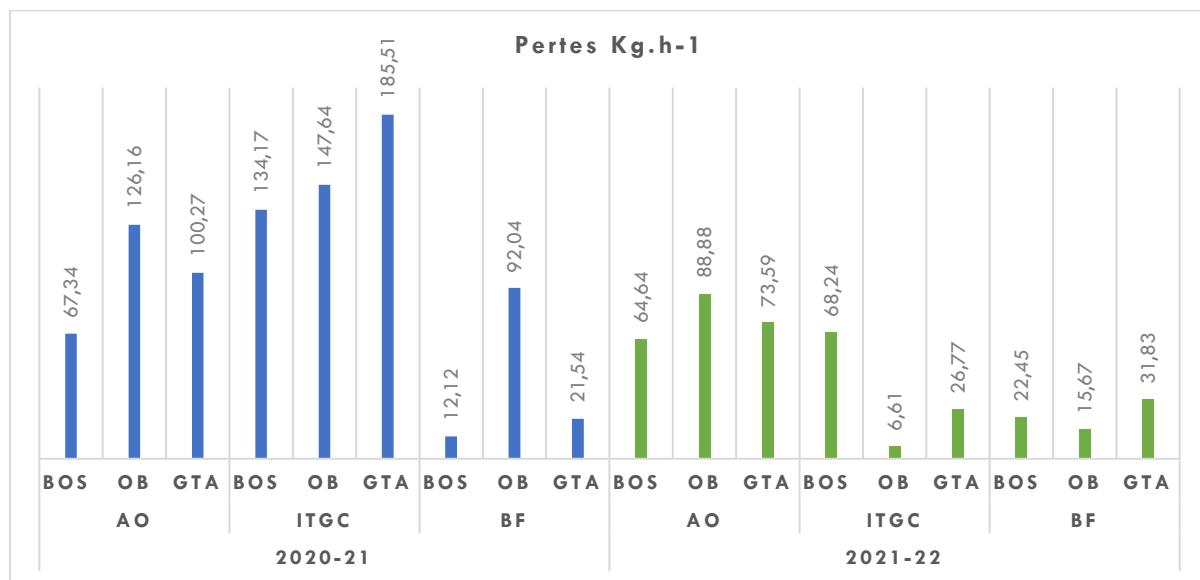


Figure 25: Variation des pertes de grains de blé dur (kg.h^{-1}) en fonction des sites expérimentaux et des campagnes de récolte.

Selon Feiffer et al, (2003), le seuil de pertes acceptable causées par la moissonneuse-batteuse se situe entre 1 et 2 %. La figure 24 illustre les variations des pertes pour l'ensemble des génotypes testés dans différents environnements. En 2020-21, à Ain Oulmène et à l'ITGC, les écarts de pertes ont varié de 0,59 à 7,94 %, indiquant des pertes largement supérieures au seuil acceptable. Ces valeurs élevées suggèrent un mauvais réglage de la machine ou une inadéquation entre la machine et les conditions de récolte. En revanche, à Beni Fouda en 2020-21 et lors de la campagne 2021-22, les écarts étaient globalement négatifs ou très proches de zéro, ce qui indique que les pertes étaient inférieures ou égales au seuil d'acceptabilité de 2 %. Cette amélioration pourrait être attribuée à une meilleure adaptation des machines aux spécificités des sites, ainsi qu'à des ajustements fins au niveau de la vitesse de récolte, de la

CHAPITRE IV : MODELISATION DES PERTES DE RENDEMENT ET EVALUATION DE LA QUALITE DE GENOTYPES DE BLE DUR EN ZONE SEMI-ARIDE

coupe et de la ventilation. De plus, l'optimisation de l'entretien et des réglages techniques des moissonneuses-batteuses a probablement contribué à cette réduction significative des pertes, permettant ainsi de maximiser l'efficacité du processus de récolte.

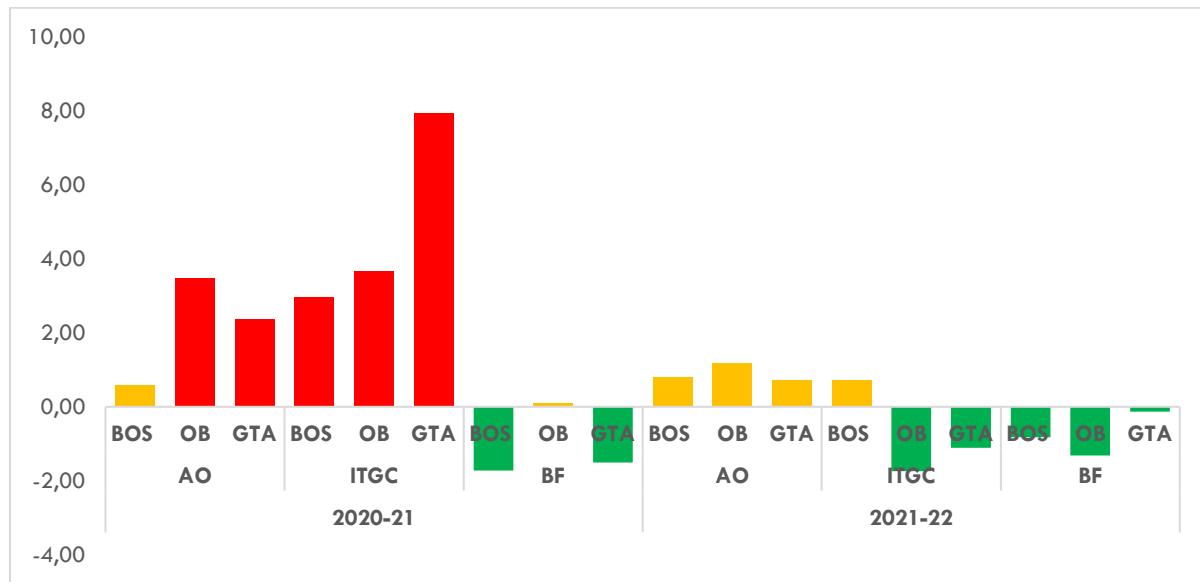


Figure 26: Écart des pertes de récolte par rapport au seuil d'acceptabilité de 2 %.

L'analyse de la comparaison des moyennes présentée dans le tableau 26 a révélé des différences très significatives ($p<0,01$) entre les moissonneuses-batteuses en ce qui concerne les pertes de grains lors de la récolte. Les moissonneuses SAMPO AO et CLAAS ITGC ont enregistré les pertes les plus élevées, avec respectivement 86,81 et 94,82 Kg.h⁻¹, soit des valeurs supérieures à la moyenne générale de +21,55% et +32,76%. En revanche, la moissonneuse PMA BF a présenté la valeur la plus faible, avec 32,60 Kg.h⁻¹, soit -45,64% en dessous de la moyenne.

L'effet de l'année a également été très significatif ($p<0,01$), avec une perte moyenne de 98,53 Kg.h⁻¹ lors de la campagne 2020–2021, contre 44,29 Kg.h⁻¹ pour la campagne suivante. Un coefficient de variation de 40,52 % indique une grande variabilité des pertes entre les différentes moissonneuses-batteuses, reflet de l'influence des ajustements techniques et des réglages opérés au fil des années. Ces résultats soulignent l'importance d'un réglage précis et d'un entretien rigoureux des machines, adaptés à nos conditions agro-techniques. Afin de limiter les pertes au moment de la récolte. Selon Hensel (2014), Les pertes à la récolte du blé sont principalement dues à des réglages inadéquats de la moissonneuse et une vitesse de déplacement trop élevée. La topographie du terrain, notamment les pentes, accentue également ces pertes et l'entretien insuffisant des machines agrgrave encore la situation.

CHAPITRE IV : MODELISATION DES PERTES DE RENDEMENT ET EVALUATION DE LA QUALITE DE GENOTYPES DE BLE DUR EN ZONE SEMI-ARIDE

Tableau 26: Analyse de la variance des pertes des grains causés par les moissonneuses batteuses.

Moissonneuses batteuses	Pertes (Kg.h ⁻¹)
CMA SAMPO AO	86,81 (a)
CLAAS ITGC	94,82 (a)
PMA BF	32,60 (b)
Moyenne	71,42
LSD 5%	37,22
CV%	40,52 %
Moissonneuses batteuses	**
Année	** 98,53 (a) 2020-21 44,29 (b) 2021-22
Moissonneuses X Année	*

Un test de stabilité selon Eberhart et Russell (1966) a été appliqué pour évaluer les comportements et performances des moissonneuses-batteuses (Tableau 27). Les résultats obtenus montrent que les machines utilisées en 2020-21 présentent un coefficient de régression élevé $b_i = 1,54 > 1$ et une variance des déviations importante $S^2d_i = 1265$, cela suggère que les moissonneuses ont des réactivités excessives aux conditions de récolte ($b_i > 1$) ils ont montré un comportement très instable avec des comportement très aléatoires, Cela indique également que le réglage de la machine n'est pas optimal et que les pertes sont influencées de manière trop sensible par des facteurs externes comme les variations de terrain, de conditions climatiques ou de la qualité et l'humidité du grain. En 2021-22, bien que les machines aient montré un comportement légèrement stable par rapport la première compagnie ($b_i = 0,460$, $S^2d_i = 695$), l'instabilité reste présente, ce qui suggère un besoin d'ajustements pour rendre la machine plus stable et réduire les pertes.

CHAPITRE IV : MODELISATION DES PERTES DE RENDEMENT ET EVALUATION DE LA QUALITE DE GENOTYPES DE BLE DUR EN ZONE SEMI-ARIDE

Tableau 27: Évaluation de la stabilité de la performance de la moissonneuse-batteuse selon l'indice d'Eberhart et Russell (1966).

Année	b_i	S^2d_i	b_i	S^2d_i	Stabilité de la machine
2020-21	1,54	1265	$b_i > 1$: Instabilité élevée, la machine à comportement aléatoire	$S^2d_i = 1265$: Forte variabilité des pertes	Machine très instable, nécessite des ajustements
2021-22	0,460	695	$b_i < 1$: instabilité moindre avec une certaine fiabilité	$S^2d_i = 695$: Moins de variabilité que 2020-21, mais encore élevée	Machine plus stable qu'en 2020-21, mais toujours instable, nécessite encore des réglages

CONCLUSION

Cette étude a fourni des informations précieuses pour l'estimation des pertes de rendement en blé dur semé sous climat semi-aride, à travers le développement et la validation d'un modèle mathématique fondé sur la dynamique de l'humidité des grains après la maturité physiologique. Des variations hautement significatives entre génotypes ont été observées pour l'ensemble des paramètres technologiques, notamment la teneur en protéines, le poids spécifique et le taux de mitadinage.

Parmi les génotypes étudiés, GTA dur s'est distingué sur les trois sites expérimentaux par un rendement en grain moyen de $32,39 \text{ q.h}^{-1}$, un poids spécifique de $76,86 \text{ kg. hL}^{-1}$ et le taux de mitadinage le plus faible (10,22 %), bien qu'il présente également la plus faible teneur en protéines (15,38 %). À l'inverse, Boussellam a affiché la teneur en protéines la plus élevée (17,35 %), mais a révélé une sensibilité plus marquée au mitadinage (12,38 %), tout en maintenant un taux de vitrosité important (87,62 %), conforme aux standards de qualité.

L'analyse statistique a mis en évidence une corrélation linéaire très hautement significative entre la baisse de l'humidité des grains et les pertes de rendement, avec une capacité explicative du modèle atteignant 61 %. L'équation de régression indique qu'au-delà de la maturité physiologique, chaque diminution d'un 1 % de l'humidité des grains entraîne une perte moyenne de $1,0151 \text{ q.h}^{-1}$ de rendement. Le modèle a démontré une bonne précision, avec une erreur absolue moyenne (EAM) de $3,12 \text{ q.h}^{-1}$, une erreur quadratique moyenne (EQM) de $3,57 \text{ q.h}^{-1}$, une efficacité de simulation (E) de 62 %, un indice d'accord (D) de 87 % et un *t*-test non significatif ($p > 0,05$), confirmant sa robustesse et sa fiabilité.

CHAPITRE IV : MODELISATION DES PERTES DE RENDEMENT ET EVALUATION DE LA QUALITE DE GENOTYPES DE BLE DUR EN ZONE SEMI-ARIDE

L’analyse de la stabilité des moissonneuses a révélé une instabilité marquée lors de la campagne 2020–2021, caractérisée par un coefficient de régression $b_i = 1,54$ et une variance des déviations $S^2 di = 1265$. Ces résultats soulignent la nécessité d’interventions techniques pour améliorer la stabilité opérationnelle des machines de récolte et réduire les pertes mécaniques.

En définitive, cette étude met en lumière l’importance d’une récolte effectuée immédiatement après la maturité physiologique des grains pour limiter les pertes de pré-récolte. Elle propose également des recommandations concrètes aux agriculteurs des zones semi-arides : le choix judicieux du génotype, la planification stratégique de la date de récolte, et l’application de bons réglages sur les moissonneuses. Cela passe par l’ajustement des paramètres techniques, un entretien régulier des machines et la formation continue des opérateurs. L’utilisation des dispositifs de mesure des pertes est également une solution efficace pour améliorer la performance de la récolte et limiter les pertes de rendement.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion Générale

Le blé dur (*Triticum durum* Desf.) constitue une culture stratégique pour l'Algérie, particulièrement dans les zones semi-arides des hauts plateaux, où il subit de multiples contraintes abiotiques. À travers cette recherche, trois axes expérimentaux complémentaires ont été abordés pour mieux cerner les déterminants de la productivité et de la qualité technologique du blé dur en conditions de stress climatique. Les résultats obtenus offrent une vision intégrée du comportement des génotypes, de la dynamique de remplissage des grains et des pertes liées à la phase de récolte.

La première partie de cette étude a mis en évidence l'importance des interactions génotype × environnement dans la modulation du rendement en grain et des caractères agro-physiologiques associés. Les analyses statistiques ont souligné la variabilité interannuelle et intersite des conditions climatiques, notamment des températures estivales élevées et une pluviométrie déficiente en hiver, qui ont fortement impacté la croissance des plantes et la productivité. Le rendement en grain s'est avéré fortement dépendant de la biomasse, du nombre d'épis par mètre carré, de la température du couvert végétal, et de la stabilité de la teneur relative en eau. La classification des génotypes a permis d'identifier des cultivars stables et performants, comme Boussellam, Oued El Bared et GTA-dur, bien que leurs performances varient selon les sites. Les meilleurs résultats ont été enregistrés à Béni Fouda, confirmant l'effet majeur du site sur les composantes du rendement.

Un point crucial révélé par cette première phase est le rôle central de la biomasse et de l'indice de récolte dans la détermination du rendement. Ces facteurs, expliquant jusqu'à 98 % de la variabilité selon les campagnes, apparaissent comme des leviers clés dans les stratégies de sélection. De même, la teneur relative en eau (TRE) s'est imposée comme un indicateur pertinent de tolérance au stress hydrique, avec des corrélations positives fortes avec le rendement. La capacité d'un génotype à maintenir une TRE élevée, une température modérée du couvert et une surface foliaire optimale conditionne ainsi sa résilience face aux sécheresses cycliques des zones semi-arides.

Dans le second volet, l'étude du processus de remplissage des grains a révélé des mécanismes physiologiques complexes et hautement influencés par les conditions climatiques. Le remplissage suit une cinétique sigmoïdale en trois phases, et les paramètres tels que le taux de remplissage des grains (TRG) et la durée de remplissage (DRG) ont montré des effets complémentaires sur le poids maximal des grains (PMAX) et le rendement final. Le génotype

Oued El Bared s'est distingué par un TRG élevé et un PMAX conséquent, tandis que GTA-dur, bien qu'ayant une plus longue DRG, n'a pas su compenser une vitesse lente d'accumulation de la matière sèche.

Ces résultats démontrent qu'une durée prolongée de remplissage ne garantit pas une productivité supérieure si elle n'est pas accompagnée d'une vitesse suffisante de transfert des assimilats. Dans des conditions semi-arides, la stratégie de sélection doit donc privilégier les génotypes alliant un bon TRG à une DRG modérée mais efficace. L'absence de relation compensatoire entre durée et taux de remplissage suggère que ces deux paramètres doivent être simultanément optimisés. Cette conclusion est d'autant plus pertinente dans le contexte du changement climatique, où les stress thermiques en fin de cycle deviennent plus fréquents. Par ailleurs, ces résultats offrent des perspectives solides pour les programmes de sélection assistée par marqueurs, visant à améliorer la stabilité du PMAX et du rendement en zones à risque climatique.

Enfin, la troisième partie de la thèse a porté sur une problématique souvent négligée : les pertes post-maturité physiologique liées au retard de récolte et à l'efficacité des moissonneuses-batteuses. À travers la mise au point d'un modèle mathématique basé sur la dynamique de la teneur en humidité des grains, l'étude a pu estimer de façon fiable les pertes de rendement associées à chaque point de récolte retardée. Le modèle s'est révélé robuste, avec une erreur absolue moyenne de 3,12 q.ha⁻¹ et une capacité explicative de 61 %. Il a montré qu'un simple abaissement de 1 % de l'humidité après la maturité physiologique entraîne une perte moyenne de 1,0151 q.ha⁻¹, ce qui confirme l'urgence d'une récolte bien planifiée.

Sur le plan technologique, des différences importantes ont été notées entre génotypes. GTA-dur a combiné un bon rendement et une faible sensibilité au mitadinage, mais une teneur en protéines relativement basse. À l'inverse, Boussellam a montré une haute teneur protéique mais une plus grande sensibilité aux altérations de qualité. Ces résultats démontrent que le compromis entre rendement et qualité technologique est souvent délicat, et qu'un équilibre doit être recherché en fonction des objectifs de production (volume vs qualité). L'étude a également mis en évidence l'instabilité des moissonneuses durant certaines campagnes, avec des pertes mécaniques amplifiées par de mauvais réglages ou un entretien insuffisant. Ceci met en lumière la nécessité d'interventions techniques ciblées : maintenance préventive, formation des opérateurs et utilisation de dispositifs de mesure des pertes pour guider les ajustements en temps réel.

En synthèse, cette thèse a permis de dégager plusieurs enseignements majeurs. Tout d'abord, la variabilité des performances agronomiques du blé dur en zones semi-arides est fortement conditionnée par les interactions génotype x environnement. Une approche multisite et pluriannuelle est donc essentielle pour identifier les cultivars les plus stables. Ensuite, la compréhension fine de la dynamique du remplissage des grains, en lien avec les stress post-anthèse, constitue un levier important pour améliorer le poids des grains et, par conséquent, le rendement. Enfin, l'impact significatif du moment de récolte et des pertes mécaniques appelle à une meilleure gestion de la phase de récolte, aussi bien en termes de planification que d'équipement technique.

L'ensemble des résultats de cette recherche contribue à éclairer les voies d'amélioration génétique, agronomique et technique pour une culture du blé dur plus efficiente, résiliente et durable dans les régions semi-arides de l'Algérie. Les recommandations issues de cette étude sont à considérer dans le cadre de futures stratégies intégrées, alliant sélection variétale, innovations culturales et mécanisation adaptée, pour répondre aux défis croissants de la sécurité alimentaire et du changement climatique.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Adjabi, A. (2011). *Étude de la tolérance aux stress abiotiques chez le blé dur (*Triticum durum Desf.*) sous étage du semi-aride* (Doctoral dissertation).
- Agriclimat. (2018). *Conseils pour la conservation des grains*. Québec. <https://www.agriclimat.ca>
- Ahmad, Z., Waraich, E. A., Akhtar, S., Anjum, S., Ahmad, T., Mahboob, W., ... & Rizwan, M. (2018). Physiological responses of wheat to drought stress and its mitigation approaches. *Acta Physiologiae Plantarum*, 40, 1-13.
- Ahmazadeh, M, 2013, Physiological and agro-morphological response to drought stress, Middle East J, Sci, Res., 13(8): 998-1009,
- Aissaoui, M. R., & Fenni, M. (2020). Assessment of some bread wheat (*Triticum aestivum L.*) performance indicators under deficit irrigation in the semi-arid conditions of north-eastern Algeria.
- Akıncı, S., & Lösel, D. M. (2012). Plant water-stress response mechanisms. In *Water stress* (Vol. 15, pp. 42–58).
- Alghabari, F., & Ihsan, M. Z. (2018). Effects of drought stress on growth, grain filling duration, yield and quality attributes of barley (*Hordeum vulgare L.*). *Bangladesh Journal of Botany*, 47(3), 421–428.
- Ali, A., Ullah, Z., Sher, H., Abbas, Z., & Rasheed, A. (2023). Water stress effects on stay green and chlorophyll fluorescence with focus on yield characteristics of diverse bread wheats. *Planta*, 257(6), 104.
- Ali, I. H. (2012). Heritability, variability, genetic correlation and path analysis for quantitative traits in durum and bread wheat under dry farming conditions. *Mesopotamia Journal of Agriculture*, 40(4), 27-0.
- Ali, S. H., & Jabara, O. K. (2021). An economic study of post-harvest losses for wheat farmers in Iraq Baghdad Governorate – Case study. *Iraqi Journal of Agricultural Sciences*, 52(5), 1267–1275.
- Allam, A., Tirichine, A., Madani, H., Benlamoudi, W., Attali, Y., 2015. Evaluation agro morphologique des cultivars locaux de blé dur: *Triticum durum Desf.* cultives dans les palmeraies de la vallée d'ouedrigh (Sud-Est Algérien). *Revue des BioRessources* 5 (7): 67- 76. DOI: 10.12816/0046301.
- Allam, A., Tirichine, A., & Madani, H. (2022). Morphological and agronomic traits characterization of six cultivars local durum wheat (*triticum durum desf.*) In oued righ region (Southeast Algeria). *Pakistan Journal of Agriculture, Agricultural Engineering and Veterinary Sciences*, 38(2), 95-102.
- Alt, D. S. (2018). *Managing risks of soft red winter wheat production: Evaluation of spring freeze damage and harvest date to improve grain quality* (Doctoral dissertation, The Ohio State University, United States). 200 p.

- Alt, D. S., Paul, P. A., Lindsey, A. J., et al. (2019). Early wheat harvest influenced grain quality and profit but not yield. *Crop, Forage & Turfgrass Management*, 5(1), 1–6.
- Amallah, L., Hassikou, R., Rhrib, K., et al. (2016). Genetic diversity analysis of durum wheat collection by agro-morphological and biochemical markers. *Journal of Materials and Environmental Science*, 7(7), 2435–2444.
- Amegbor, I. K., van Biljon, A., Shargie, N., Tarekegne, A., & Labuschagne, M. T. (2022). Heritability and associations among grain yield and quality traits in quality protein maize (QPM) and non-QPM hybrids. *Plants*, 11(6), 713.
- Anjum, S. A., Xie, X., Wang, L. C., Saleem, M. F., Man, C., & Lei, W. (2011). Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress. *African Journal of Agricultural Research*, 6(9), 2026–2032.
- Annicchiarico, P., Bellah, F., & Chiari, T. (2006). Repeatable genotype × location interaction and its exploitation by conventional and GIS-based cultivar recommendation for durum wheat in Algeria. *European Journal of Agronomy*, 24(1), 70–81.
- Aouz, A., Khan, I., Chattha, M. B., Ahmad, S., Ali, M., Ali, I., ... & Hassan, M. U. (2023). Silicon induces heat and salinity tolerance in wheat by increasing antioxidant activities, photosynthetic activity, nutrient homeostasis, and osmo-protectant synthesis. *Plants*, 12(14), 2606.
- Arjona, J. M., Royo, C., Dreisigacker, S., Ammar, K., & Villegas, D. (2018). Effect of *Ppd-A1* and *Ppd-B1* allelic variants on grain number and thousand kernel weight of durum wheat and their impact on final grain yield. *Frontiers in Plant Science*, 9, 888.
- ARVALIS – Institut du végétal. (2024). *Zoom sur la qualité des variétés de blé dur en 2023*. <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/choix-varietal-en-ble-dur-tenir-compte-de-la-qualite-technologique-et-sanitaire>
- Astereki, H., Sharifi, P., & Pouresmael, M. (2017). Correlation and path analysis for grain yield and yield components in chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Genetika*, 49(1), 273–284.
- Atoui, A., Boudour, L., Chaib, G., & Boudersa, N. (2021). Evaluation of diversity in some genotypes of Algerian durum wheat using agronomical and biochemical markers. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 22(4).
- Ayed, S., Othmani, A., Bouhaouel, I., Teixeira da Silva JA. 2021, Multienvironment screening of durum wheat genotypes for drought tolerance in changing climatic events, *Agronomy* 11:875,
- Bahlouli, F., Bouzerzour, H., Benmohammed, A., & Hassous, K. L. (2005). Selection of high yielding and risk efficient durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivars under semi-arid conditions.
- Bakha W, Boudekhane A, Chekara BM, 2019, Contribution to the study of morphological, physiological and biochemical parameters under water stress of a collection of Saharan bread wheat, Algeria: Oum El Bouaghi University,

- Bannayan, M., & Eyshi Rezaei, E. (2014). Future production of rainfed wheat in Iran (Khorasan province): Climate change scenario analysis. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 19, 211–227.
- Basu, S., Ramegowda, V., Kumar, A., & Pereira, A. (2016). Plant adaptation to drought stress. *F1000Research*, 5, 1554.
- Bayer Crop Science Canada. (2021). *Relation entre le poids spécifique du maïs et la vitesse de dessiccation*. <https://www.cropscience.bayer.ca/fr-ca/articles/2021/corn-drydown-rate-and-test-weight-relationship>
- Beauval, V. (2017). Hauts Plateaux algériens : la supériorité des variétés paysannes de céréales. *Inf'OGM*. <https://infogm.org/hauts-plateaux-algeriens-superiorite-des-varietes-paysannes-de-cereales>
- Bekaddour, H., Benkherbache, N., Yahiaoui, S., Djenadi, C., Benbelkacem, A., Hebbache, H., & Akkouche, A. (2024). Multivariate analysis of agro-morphological and quality traits of a durum wheat collection under rainfed Algerian conditions. *Journal of Central European Agriculture*, 25(2), 362-374.
- Belagrouz, A., Chennafi, H., Bouzerzour, H., Hakimi, M., Razem, R., & Sahraoui, A. H. (2018). Relationships among water use efficiency and the physio-agronomic traits in durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivars assessed under rainfed conditions of the eastern high plateaus of Algeria. *Poljoprivreda i Sumarstvo*, 64(3), 159-172.
- BENALIA, F. 2024. Effet des changements environnementaux sur les indicateurs de la sénescence foliaire et son efficacité tant qu'indicateur pour la sélection de variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) en conditions semi-arides. Thèse de doctorat, Université Farhat Abbas Sétif 1, Algérie.
- Ben-Amar, A., Mahboub, S., Bouizgaren, A., Mouradi, M., Nsarellah, N. E., & El Bouhmadi, K. (2020). Relationship between leaf rolling and some physiological parameters in durum wheat under water stress. *African Journal of Agricultural Research*, 16(7), 1061-1068.
- Benaseer, S., Masilamani, P., Albert, V. A., Govindaraj, M., Selvaraju, P., & Bhaskaran, M. (2018). Impact of harvesting and threshing methods on seed quality – A review. *Agricultural Reviews*, 39(3), 183–192.
- Benchikh-Lehocine, M., Álvarez-Iglesias, L., Revilla, P., Malvar, R. A., Djemel, A., & Laouar, M. (2025). Response to selection for drought tolerance in Algerian maize populations for Spanish conditions. *Agronomy*, 15(2), 499.
- 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 Doctorat, Université Mohamed Boudhiaf M'sila, Algérie ,152p,
- Benderradjji, L., Saibi, W., & Brini, F. (2021). Role of ABA in overcoming environmental stress: Sensing, signaling and crosstalk. *Annals of Agricultural and Crop Sciences*, 6, 1070.
- BenHamed M, Ben Amara S, 2020, In vitro physiological morpho characterization at tilling stage in durum wheat (*Triticum durum* Desf,) under water stress, PhD Thesis, Mohamed Boudiaf-M'Sila University, Algeria,

- Benkadja, S., Maamri, K., Guendouz, A., Oulmi, A., & Frih, B. (2022). Stability analysis for grain yield and thousand kernel weight of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) genotypes growing under semi-arid conditions. *Agricultural Science & Technology* (1313-8820), 14(2).
- Benmohammed, A. (2005). Hétérosis transgressions et efficacité de la sélection précoce et retardée de la biomasse, du nombre d'épis et utilisation des indices chez l'orge (*Hordeum vulgare* L.). [Thèse]. Université de Constantine, Algérie.
- Benmohammed, A., Bouzerzour, H., Mekhlouf, A., & Benbelkacem, A. (2008). Variation de la teneur relative en eau, l'intégrité cellulaire, la biomasse et l'efficience d'utilisation de l'eau des variétés de blé dur (*Triticum turgidum* L. var. *durum*) conduites sous contrainte hydrique. *Recherche Agronomique, INRA*, 21, 37–47.
- Benmehaia, A. M., Merniz, N., & Oulmane, A. (2020). Spatiotemporal analysis of rainfed cereal yields across the eastern high plateaus of Algeria: an exploratory investigation of the effects of weather factors. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 5(3), 54.
- Benniou R, Badache F, Regoub A, Bendada H. (2018). Etude comparative du comportement et de l'adaptation de différents génotypes de blé dur (*Triticum durum* Desf.) en zone semi-aride dans l'Est de l'Algérie, Rev Agric 9 (1) : 16-31,
- Benziouche Achouak DS. (2021). Contribution to the characterization of some advanced lines of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) from the Sétif region, PhD Thesis, Mohamed El Bachir El Ibrahimi, Algeria,
- Berkane, I., Bendada, H., Frih, B., Belagrouze, A., Louahdi, N., & Mehanni, O. (2023). Assessment of Some Physiological and Biochemical Traits for Selection of Tolerant Barley Genotypes (*Hordeum vulgare* L.) in Rainfall Conditions.
- Bhattarai, P., Pokhrel, M., Poudel, S., Neupane, S., Mainali, R., & Kharel, G. (2022). Effect of drought stress on wheat and drought breeding status for it in Nepal with the way forward: A review. *Reviews in Food and Agriculture*, 3(1), 24–28.
- Biswal, A. K., & Kohli, A. (2013). Cereal flag leaf adaptations for grain yield under drought: knowledge status and gaps. *Molecular Breeding*, 31, 749-766.
- Bouchemal, K., & Djekoun, A. (2018). *Étude des enzymes du stress oxydatif chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.)* (Doctoral dissertation, Université Frères Mentouri-Constantine 1).
- Boudersa, N., Chaib, G., AICHA, A., Cherfia, R., Bouderbane, H., & Boudour, L. (2021). Assessment of biological and agronomic diversity of seven durum wheat varieties cultivated in the Northeastern region of Algeria, *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 22(2),
- Boudjabi, S., Kribaa, M., & Chenchouni, H. (2019). Sewage sludge fertilization alleviates drought stress and improves physiological adaptation and yield performances in Durum Wheat (*Triticum durum*): a double-edged sword. *Journal of King Saud University-Science*, 31(3), 336-344.
- Boulelouah, N., Berbache, M. R., Bedjaoui, H., Selama, N., & Rebouh, N. Y. (2022). Influence of nitrogen fertilizer rate on yield, grain quality and nitrogen use efficiency of durum wheat

(*Triticum durum* Desf) under Algerian semiarid conditions. *Agriculture*, 12(11), 1937.

Bourouh, L., Souilah, N., Mouad, B., Chaib, G., Hazmoune, T., & Hamdi, B. (2023). Study of Production and Adaptation Characters of Some Newly Obtained Genotypes of Durum Wheat (*Triticum Durum* Desf.) in Sub-Humid Region (El Harrouch North-Eastern of Algeria). *Journal of Bioresource Management*, 10(2), 7.

Bousalhih, B., Mekliche, L., Aissat, A., & Halim, S. B. (2016). Study of genetic determinism of harvest index in durum wheat (*Triticum durum* Desf) under semi-arid conditions. *African Journal of Biotechnology*, 15(47), 2671-2677.

Bożek, K. S., Żuk-Gołaszewska, K., Bochenek, A., Gołaszewski, J., & Kalaji, H. M. (2021). Modelling the growth, development and yield of *Triticum durum* Desf. under the changes of climatic conditions in north-eastern Europe. *Scientific Reports*, 11(1), 21753.

Broccanello, C., Bellin, D., DalCorso, G., Furini, A., & Taranto, F. (2023). Genetic approaches to exploit landraces for improvement of *Triticum turgidum* ssp. *durum* in the age of climate change. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1101271.

Campos, C, N,, Torres, G, A, L,, Lopes, A, R,, Pantano, A, P,, & de Almeida, J, A, S, (2023), Influence of meteorological factors on the relative water content of coffee plants in the field, *Agrometeoros*, 31,

Cassells, J. A., Reuss, R., Osborne, B. G., & Wesley, I. J. (2007). Near infrared spectroscopic studies of changes in stored grain. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 15(3), 161–167.

Castilhos, G., F, Lazzarotto, L, Spagnolo-Fonini, M,H, Bodanese-Zanettini and M, Margis-Pinheiro, 2014, Possible roles of basic helix-loop-helix transcription factors in adaptation to drought, *Plant Sci*, 223: 1-7,

CGC – Canadian Grain Commission. (2021). *Test weight*. In *Official Grain Grading Guide* (pp. 4–15). Winnipeg, MB: Industry Service. <https://www.grainscanada.gc.ca/en/grain-quality/official-grain-grading-guide/oggg-july-1-2021-en.pdf>

Chahbar, S., & Belkhodja, M. (2016). Water deficit effects on morpho-physiological parameters in durum wheat. *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 8(3), 1166–1181.

Chaimala, A., Jogloy, S., Vorasoot, N., C Holbrook, C., Kvien, C, K,, & Laohasiriwong, S. (2023). The variation of relative water content, SPAD chlorophyll meter reading, stomatal conductance, leaf area, and specific leaf area of Jerusalem artichoke genotypes under different durations of terminal drought in tropical region, *Journal of Agronomy and Crop Science*, 209(1), 12-26,

Chaouachi L, Marín-Sanz M, Kthiri Z, Boukef S, Harbaoui K, Barro F, Karmous C. (2023). The opportunity of using durum wheat landraces to tolerate drought stress: screening morphophysiological components, *AoB Plants* 15:1–14,

Chaouachi, L., Marín-Sanz, M., Barro, F., & Karmous, C. (2024). Study of the genetic variability of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) in the face of combined stress: water and heat, *AoB Plants*, 16(1), plad085,

Chennafi, H. (2007). Stratégie de gestion des apports d'eau limités sur la culture du blé dur

(Triticumdurum, Desf.) en milieu semi-aride des hautes plaines sétifiennes (Algérie), These de Doctorat d'état en Sciences Agronomiques, INA, p, 81,

Cheriet, F. (2021). Les statistiques agricoles en Algérie : entre défaillance et manipulations. Pour une économie politique de l'agriculture. *Systèmes alimentaires / Food Systems*, (6), 327–332. <https://classiques-garnier.com/systemes-alimentaires-food-systems-2021-n-6-varia-les-statistiques-agricoles-en-algerie-entre-defaillance-et-manipulations-pour-une-economie-politique-de-l-agriculture-en.html>

Chermat, Sabah. (2013). Etude phytosociologique et pastorale des djebels youssef et zdimm (Hautes plaines Sétifiennes), Thèse de doctorat, Université Farhat Abbas Sétif 1, Algérie.

Constantinidou, K., Hadjinicolaou, P., Zittis, G., & Lelieveld, J. (2016). Effects of climate change on the yield of winter wheat in the eastern Mediterranean and Middle East, *Climate Research*, 69(2), 129-141,

Cornec, N. (2008). Une organisation souterraine structurée. *Perspectives Agricoles*, (363), 22–29.

Croston, R. P., & Williams, J. T. (1981). A world survey of wheat genetic resources. *IBRGR Bulletin*, 80/59, 1–37.

Dalila, S., Lakhdar, Z., Mawhoub, A., Hakim, B., & Mohamed, S. (2021). Monthly rainfall variability and vulnerability of rainfed cereal crops in the Tellian highlands of Algeria. In *International Conference on Natural Resources and Sustainable Environmental Management* (pp. 240–251). Springer International Publishing.

Deliberali, J., Oliveira, M., Durigon, A., et al. (2010). Effects of drying process and storage time on the technological quality of wheat. *Ciência e Agrotecnologia*, 34(5), 1285–1292.

Derbal, N., Benbelkacem, A., & Tahar, A. (2015). Spatial variation of quality traits in Algerian durum wheat cultivated in different environments. African Journal of Agricultural Research, 10(9), 919-925.

Dewey, D, R., & Lu, K, H. (1959). "A Correlation and Path-Coefficient Analysis of Components of Crested Wheatgrass Seed Production," *Agronomy Journal*, 51(9), 515–518,

Di Mola, I., Conti, S., Cozzolino, E., et al. (2021). Plant-based protein hydrolysate improves salinity tolerance in hemp: Agronomical and physiological aspects. *Agronomy*, 11(2), 342.

Djouadi, K., Mekliche, A., Dahmani, S., Ladjiar, N. I., Abid, Y., Silarbi, Z., ... & Pisante, M. (2021). Durum wheat yield and grain quality in early transition from conventional to conservation tillage in semi-arid Mediterranean conditions. *Agriculture*, 11(8), 711.

Djoudi, M. B. I., Cheniti, K., Guendouz, A., & Louahdi, N. (2024). Modeling the grain yield loss and quality assessment of some durum wheat (Triticum durum Desf.) genotypes under semi-arid conditions, *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 77(1), 10563-10572,

Djoudi, M. B. I., Cheniti, K., Guendouz, A., Louahdi, N., & Belguet, H. (2023). Assessment of durum wheat (*Triticum durum*) genotypes on grain filling parameters. *The Indian Journal of Agricultural Sciences*, 93(8), 1–8.

- Dorrian, K., Mkhabela, M., Sapirstein, H., & Bullock, P. (2023). Effects of delayed harvest on wheat quality, gluten strength, and protein composition of hard red spring wheat. *Cereal Chemistry*, 100(1), 196–212.
- Dorrian, K., Mkhabela, M., Sapirstein, H., et al. (2023). Effets d'une récolte tardive sur la qualité du blé, la force du gluten et la composition en protéines du blé dur de printemps. *Cereal Chemistry*, 100(1), 196–212.
- Draper, N, R., & Smith, H. (1998). *Applied regression analysis* (Vol, 326), John Wiley & Sons,
- Dubcovsky, J., & Dvorak, J. (2007). Genome plasticity: A key factor in the success of polyploid wheat under domestication. *Science*, 316(5833), 1862.
- Dziki, D., & Laskowski, J. (2005). Wheat kernel physical properties and milling process. *Acta Agrophysica*, 6(1), 59–71.
- Eberhart, S. A., & Russell, W. A. (1966). Stability parameters for comparing varieties. *Crop Science*, 6(1), 36–40.
- El Haddad, N., Choukri, H., Ghanem, M. E., Smouni, A., Mentag, R., Rajendran, K., ... & Kumar, S. (2021). High-temperature and drought stress effects on growth, yield and nutritional quality with transpiration response to vapor pressure deficit in lentil. *Plants*, 11(1), 95.
- El idrissi, I. S., Kettani, R., Ferrahi, M., Mohamed, E. F., Rabea, Z. I. R. I., & BRHADDA, N. (2023). Comparative Field Studies of Biochemical and Agro-physiological Parameters in semi-arid zone with rainfall Moroccan climate Of Durum wheat.
- El Melki, M. N., Al-Khayri, J. M., Aldaej, M. I., Almaghasla, M. I., El Moueddeb, K., & Khelifi, S. (2023). Assessment of the effect of climate change on wheat storage in Northwestern Tunisia: Control of *Rhyzopertha dominica* by aeration. *Agronomy*, 13(7), 1773.
- El Sabagh, A., Islam, M. S., Skalicky, M., et al. (2021). Salinity stress in wheat (*Triticum aestivum* L.) in the changing climate: Adaptation and management strategies. *Frontiers in Agronomy*, 3, 661932.
- ElBasyoni, I., Saadalla, M., Baenziger, S., Bockelman, H., & Morsy, S. (2017). Cell membrane stability and association mapping for drought and heat tolerance in a worldwide wheat collection. *Sustainability*, 9(9), 1606.
- El-Hendawy, S. E., Al-Suhailani, N. A., Elsayed, S., Hassan, W. M., Dewir, Y. H., Refay, Y., & Abdella, K. A. (2019). Potential of the existing and novel spectral reflectance indices for estimating the leaf water status and grain yield of spring wheat exposed to different irrigation rates. *Agricultural Water Management*, 217, 356-373.
- Embrapa, S. (2011). *Tecnologias de produção de soja – região central do Brasil 2012 e 2013* (15, p. 261). Londrina: Embrapa Soja.
- Epée Missé, P. T. (2018). Wheat seedling physiological adaptation to overcome water stress. Available at SSRN 3307427.
- Erroux, J., & Laumont, P. (1961). *Mémoire de la Société d'Histoire Naturelle de l'Afrique du Nord*, 5, 1–95.

Etminan, A., Pour-Aboughadareh, A., Mohammadi, R., Shoshtari, L., Yousefiazarkhanian, M., Moradkhani, H. (2019). Determining the best drought tolerance indices using artificial neural network (ANN): Insight into application of intelligent agriculture in agronomy and plant breeding, *Cereal Res, Commun*, 47, 170–181,

Fakhri, S., Rahnama, A., & Meskarbashi, M. M. (2016). Relation between root growth traits and physiological indices of two bread wheat cultivars under salt stress. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 47(1), 109–117.

FAO. (2015). *Profil de pays - Algérie : Vers une agriculture plus efficace dans l'utilisation de l'eau dans la région du Proche-Orient et de l'Afrique du Nord (Initiative NENA)*. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/17713bcc-d3d9-4df8-b18c-279c663cd9d7/content>

FAO. (2017). *The Future of Food and Agriculture: Trends and Challenges*. Rome: FAO. <http://www.fao.org/3/a-i6583e.pdf>

FAO. (2024). *GIEWS Country Brief: The People's Democratic Republic of Algeria*. Système mondial d'information et d'alerte rapide sur l'alimentation et l'agriculture (GIEWS). https://www.fao.org/giews/countrybrief/country/DZA/pdf_archive/DZA_Archive.pdf

FAO. (2024). *Algeria – Agricultural Stress Index (ASI), April 2024*. Global Information and Early Warning System (GIEWS) – Agricultural Stress Index System (ASIS). Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/giews/earthobservation/country/index.jsp?lang=en&code=DZA>

FAOSTAT. (2020). *Statistical Database of the Food and Agriculture Organization of the United Nations*.

FAOSTAT. (2025). *Statistical Database of the Food and Agriculture Organization of the United Nations*.

Farooq, M., Hussain, M., Wahid, A., & Siddique, K. H. (2012). Drought stress in plants: An overview. In P. Ahmad & M. N. V. Prasad (Eds.), *Plant responses to drought stress: From morphological to molecular* (pp. 1–33). Springer.

Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D., & Basra, S. M. A. (2009). Plant drought stress: Effects, mechanisms, and management. In E. Lichtfouse, M. Navarrete, P. Debaeke, V. Souchère, & C. Alberola (Eds.), *Sustainable agriculture* (pp. 153–188). Springer.

Feiffer, P., Feiffer, A., Schwaiberger, R., et al. (2003). Hydro N-sensor. In *International Conference on Crop Harvesting and Processing* (p. 76). American Society of Agricultural and Biological Engineers.

Feillet, P. (2000). *Le grain de blé : Composition et utilisation*. INRA.

Fellahi, Z., Hannachi, A., Bouzerzour, H., & Boutekrabt, A. (2013). Study of interrelationships among yield and yield related attributes by using various statistical methods in bread wheat (*Triticum aestivum* L. em Thell.).

- Fellahi, Z. E. A., Hannachi, A., Guendouz, A., Rabti, A., & Bouzerzour, H. (2019). Héritabilité, corrélations et gain de sélection précoce en F2 de blé tendre (*Triticum aestivum* L.) sous conditions semi-arides. *Journal algérien des régions arides*, 13(2), 37-49.
- Fellahi, Z. E. A., Boubellouta, T., Hannachi, A., Belguet, H., Louahdi, N., Benmohammed, A., & Rebouh, N. Y. (2024). Exploitation of the Genetic Variability of Diverse Metric Traits of Durum Wheat (*Triticum turgidum* L. ssp. *durum* Desf.) Cultivars for Local Adaptation to Semi-Arid Regions of Algeria, *Plants*, 13(7), 934,
- Ferguson, J. N., Tidy, A. C., Murchie, E. H., & Wilson, Z. A. (2021). The potential of resilient carbon dynamics for stabilizing crop reproductive development and productivity during heat stress. *Plant, Cell & Environment*, 44(7), 2066–2089.
- Figueiredo, A. S., de Resende, J. T. V., Morales, R. G. F., Meert, L., & Rizzardi, D. A. (2013). Influência da umidade de grãos de trigo sobre as perdas qualitativas e quantitativas durante a colheita mecanizada. *AMBIÊNCIA*, 9(2), 349–357.
- Forster, S. M. (2016). *Agronomic practices that impact grain quality factors of durum wheat (Triticum turgidum L. var. durum Desf.).* <http://hdl.handle.net/10365/25850>
- Frih, B., Oulmi, A., & Guendouz, A. (2022). Efficiency of numerical images analysis in selection of durum wheat [*Triticum turgidum* (L.) ssp. *Durum* (desf.) husn.] genotypes growing under semi-arid conditions in Algeria. Agricultural Science Digest-A Research Journal, 42(5), 548-554.
- Gagliardi, L., Sportelli, M., Fontanelli, M., Sbrana, M., Luglio, S. M., Raffaelli, M., & Peruzzi, A. (2023). Effects of Conservation Agriculture Practices on Tomato Yield and Economic Performance. *Agronomy*, 13(7), 1704.
- Gan, Y. T., McCaig, T. N., Clarke, P., et al. (2000). Test-weight and weathering of spring wheat. *Canadian Journal of Plant Science*, 80(4), 677–685.
- Gao, Z., Wang, Y., Tian, G., Zhao, Y., Li, C., Cao, Q., ... & He, M. (2020). Plant height and its relationship with yield in wheat under different irrigation regime. *Irrigation Science*, 38(4), 365-371.
- Geyer, M., Mohler, V., & Hartl, L. (2022). Genetics of the inverse relationship between grain yield and grain protein content in common wheat. *Plants*, 11(16), 2146.
- Ghanem, 2017, Comparative study of interspecific variability: morphphenology and evaluation of antioxidant activity and biological activity in *Triticum durum*, *Triticum aestivum* and *Hordeum vulgare*, *Triticum aestivum* et *Hordeum vulgare*, Algeria: University of the Mentouri Brothers, 1–83,
- Ghennai, A., Zerafa, C., Benlaribi, M. (2017). Étude de la diversité génétique de quelques variétés de blé tendre (*Triticum aestivum* L.) et de blé dur (*Triticum durum* Desf.) selon la base des caractères de l'UPOV, *J Appl Biosci* 113 (1): 11246-11256,
- Gilani, M., Danish, S., Ahmed, N., Rahi, A. A., Akrem, A., Younis, U., & Iqbal, R. K. (2020). Mitigation of drought stress in spinach using individual and combined applications of salicylic acid and potassium, *Pak. J. Bot.*, 52(5), 1505-1513,

GIPSA – Grain Inspection, Packers and Stockyards Administration. (2020). *Grain Inspection Handbook, Book II, Grain Grading Procedures*. Chapter 13 – Wheat. U.S. Department of Agriculture. <https://www.ams.usda.gov/sites/default/files/media/Book2.pdf>

Gnofam, N., Tozo, K., Bonfoh, B., Akantetou, K. P., Kolani, L., & Ampouzouvi, K. (2014). Effets d'un déficit hydrique sur certains paramètres morphologiques, physiologiques et de rendement chez le cotonnier (*Gossypium hirsutum* L. CV STAM129A) cultivé au Togo. *Agronomie Africaine*, 26(2), 113-126.

Grain Canada. (2023). *Quality factors in durum wheat and storage conditions*. Gouvernement du Canada. www.grainscanada.gc.ca

Grosse-Heilmann, M., Cristiano, E., Deidda, R., & Viola, F. (2024). Durum wheat productivity today and tomorrow: A review of influencing factors and climate change effects. *Resources, Environment and Sustainability*, 100170.

Guendouz, A., Semcheddine, N., Moumeni, L., & Hafsi, M. (2016). The effect of supplementary irrigation on leaf area, specific leaf weight, grain yield and water use efficiency in durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivars, *Ekin Journal of Crop Breeding and Genetics* 2(1): 82-89,

Guendouz, A., Guessoum, S., Maamri, K., & Hafsi, M. (2012). The effect of supplementary irrigation on grain yield, yield components and some morphological traits of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivars. *Adv. Environ. Biol.*, 6(2), 564-572.

Guendouz, A., Guessoum, S., Maamri, K., Benidir, M., & Hafsi, M. (2012). Canopy temperature efficiency as indicators for drought tolerance in durum wheat (*Triticum durum* Desf.) in semi arid conditions. *Journal of Agriculture and Sustainability*, 1(1).

Guendouz, A., Guessoum, S., Maamri, K., Benidir, M., & Hafsi, M. (2013). Performance of ten durum wheat (*triticum durum* desf.) cultivars under semi arid conditions (North Africa-Algeria). *Indian Journal of Agricultural Research*, 47(4), 317-322.

Guendouz, A., Djoudi, M., Guessoum, S., Maamri, K., Hannachi, A., Fellahi, Z., & Hafsi, M. (2014). Genotypic and phenotypic correlations among yield and yield components in durum wheat (*Triticum durum* Desf.) under different water treatments in Eastern Algeria. *Annual Research & Review in Biology*, 4(2), 432-442.

Guendouz, A., Semcheddine, N., Moumeni, L., & Hafsi, M. (2016). The effect of supplementary irrigation *Ekin Journal of Crop Breeding and Genetics*, 2(1), 82-89.

Guendouz, A., Frih, B., & Oulmi, A. (2021). Canopy Cover temperature & drought tolerance indices in durum wheat (*Triticum durum* Desf.) genotypes under semi-arid condition in Algeria, *International Journal of Bio-resource and Stress Management*, 12(6), 638-644.

Guendouz, A., Hannachi, A., Fellahi, ZEA., & Benalia, F. (2021). Phenotypic characterization of some durum wheat (*Triticum durum* Desf.) genotypes growing under semi-arid conditions. *International Journal of Bio-resource and Stress Management*, 12(6), 725-730.

Gustavsson, J., Cederberg, C., Sonesson, U., et al. (2011). *Global food losses and food waste: Extent, causes and prevention*. Rome: FAO. <https://www.fao.org/3/i2697e/i2697e.pdf>

- Hacini, N. (2014). *Étude de l'interaction génotype × environnement et effet de l'origine de quelques cultivars de blé dur (*Triticum durum* Desf.) sur les aptitudes adaptatives et qualitatives* (Thèse de doctorat en biologie végétale). Université Badji Mokhtar - Annaba.
- Haddad, L., Bachir, A., Benmohammed, A., & Bouzerzour, H. (2021). Durum wheat (*Triticum turgidum* ssp. *durum*) improvement during the past 67 years in Algeria. *Jordan Journal of Biological Sciences*, 14(2), 327–336.
- Hales, N. (2025). *Grain and Feed Update – Algiers, Algeria* (Report No. AG2025-0001). U.S. Department of Agriculture, Foreign Agricultural Service.
- Hannachi, A., Fellahi, Z.E.A., Bouzerzour, H., & Boutekrabt, A. (2013). correlation, path analysis and stepwise regression in durum wheat (*triticum durum* desf.) under rainfed conditions. *journal of agriculture and sustainability*, 3(2).
- Hannachi, A., Fellahi, Z. E. A. (2023). Efficiency of index-based selection for potential yield in durum wheat [*Triticum turgidum* (L.) ssp, *turgidum* convar, *durum* (Desf,) Mackey] lines, *Italian Journal of Agronomy*, 18(1),
- Harrag, M., & Boulfred, Y. (2019). Food security in Algeria: An analytical study on cereals. *Revue de l'Economie Financière et des Affaires*, 3(2), 162–188.
- Hashem, L. F., & Al-Issawi, M. H. (2023, December). Chlorophyll content variation in wheat genotypes planted in semi-arid region. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1252, No. 1, p. 012025). IOP Publishing.
- Hassen, N. A., Hacini, N., Djelloul, R., Bencherif, K., & Azizi, N. N. (2024). Effects of drought stress on the behavior of seven genotypes of durum wheat (*triticum durum* desf.) Under greenhouse conditions. *Applied Ecology & Environmental Research*, 22(1).
- Heinze, K., Kiszonas, A. M., Murray, J. C., et al. (2016). Puroindoline genes introduced into durum wheat reduce milling energy and change milling behavior similar to soft common wheats. *Journal of Cereal Science*, 71, 183–189.
- Henni, M. (2022). Intervention sur la superficie céréalière en Algérie, Première session du Conseil national de l'UNPA, Alger, 16 Mai 2022, Le ministre de l'Agriculture et du Développement rural, https://www.agrialgerie.com/superficies-agricoles-recoltes-2022-algerie/?utm_source=chatgpt.com
- Henry, Y., & Beyser, J. (2000). Origine des blés dans la science. *H série*, 26, 60–62.
- Hensel, M. J. (2014). *Évaluation des pertes dans la récolte mécanisée du blé* [Mémoire de licence, Universidade Federal da Fronteira Sul].
- Hill, C. B., Angessa, T. T., Westcott, S., McFawn, L. A., Shirdelmoghhanloo, H., Han, Y., & Li, C. (2024). Evaluation of the impact of heat stress at flowering on spikelet fertility and grain quality in barley, *Agriculture Communications*, 2(4), 100066,
- Hniličková, H., HNILIČK, F., Orsák, M., & Hejnák, V. (2019). Effect of salt stress on growth, electrolyte leakage, Na⁺ and K⁺ content in selected plant species, *Plant, Soil & Environment*, 65(2),

- Hu, S., Ding, Y., & Zhu, C. (2020). Sensitivity and responses of chloroplasts to heat stress in plants. *Frontiers in Plant Science*, 11, 375.
- Hussain, H. A., Hussain, S., Khaliq, A., Ashraf, U., Anjum, S. A., Men, S., & Wang, L. (2018). Chilling and drought stresses in crop plants: Implications, cross talk, and potential management opportunities. *Frontiers in Plant Science*, 9, 393.
- Hussain, H. A., Men, S., Hussain, S., Chen, Y., Ali, S., Zhang, S., ... & Wang, L. (2019). Interactive effects of drought and heat stresses on morpho-physiological attributes, yield, nutrient uptake and oxidative status in maize hybrids. *Scientific reports*, 9(1), 3890.
- Ibrahim, A. (2018). Monitoring some quality attributes of different wheat varieties by infrared technology. *Agricultural Engineering International : CIGR Journal*, 20(1), 201–210.
- Ichsan, C. N., Andani, R., Basyah, B., Zakaria, S., & Efendi, E. (2022). The relationship between relative water content of leaves, soluble sugars, accumulation of dry matter, and yield components of rice (*Oryza sativa* L.) under water-stress condition during the generative stage. *International Journal of Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 12(3), 899–907.
- IDRC – International Development Research Centre Canada. (2010). *Facts and figures on food and biodiversity*. <https://www.idrc.ca/en/research-in-action/facts-figures-food-and-biodiversity>
- ISA. (2015). *Don't let bushels "disappear"*. Iowa Soybean Association. <http://www.iasoybeans.com/stories/2015/10/23/>
- ITGC– Institut Technique des grandes cultures. (2022). *La production de blé en Algérie*.
- ITGC– Institut Technique des grandes cultures en Algérie (2022), La production de blé, <https://www.itgc.dz/>,
- ITGC– Institut Technique des grandes cultures en Algérie (2025). Fiches techniques. https://www.itgc.dz/?product_cat=fiches-techniques
- Jaisi, S., Thapa, A., & Poudel, M. R. (2021). Study of correlation coefficient and path analysis among yield parameters of wheat: a review. *INWASCON Technology Magazine*, 3, 01-04.
- Ji, H., Xiao, L., Xia, Y., Song, H., Liu, B., Tang, L., ... & Liu, L. (2017). Effects of jointing and booting low temperature stresses on grain yield and yield components in wheat. *Agricultural and Forest Meteorology*, 243, 33–42.
- Jin, R., Wang, Y., Liu, R., Gou, J., & Chan, Z. (2016). Physiological and metabolic changes of purslane (*Portulaca oleracea* L.) in response to drought, heat, and combined stresses. *Frontiers in Plant Science*, 6, 1123.
- Jolliffe, I. T. (2002). *Principal component analysis for special types of data* (pp, 338-372), Springer New York,
- Kadioglu, A., Terzi, R., Saruhan, N., & Saglam, A. (2012). Current advances in the investigation of leaf rolling caused by biotic and abiotic stress factors. *Plant Science*, 182, 42–48.
- Kahraman, N. D., & Gökm̄en, S. (2023). Determination of some quality characteristics of

durum wheat under dry conditions in Konya. *Selcuk Journal of Agriculture and Food Sciences*, 37(1), 64–71.

Kalaji, H. M., Jajoo, A., Oukarroum, A., Brešić, M., Živčak, M., Samborska, I. A., ... & Ladle, R. J. (2016). Chlorophyll a fluorescence as a tool to monitor physiological status of plants under abiotic stress conditions. *Acta physiologiae plantarum*, 38, 1-11.

Kara, K. (2015). *Interactions génotype-milieu de variétés de blé tendre (Triticum aestivum L.) sous stress hydrique* [Thèse de doctorat, Université des Frères Mentouri Constantine].

Karkour, L., Fenni, M., Ramla, D., Gaad, D., & Benbelkacem, A. (2019). Evaluation of agronomic performances of rainfed barley double-haploids (DHs) lines under semi-arid conditions. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 20(5).

Kaya, Y., & Akcura, M. (2014). Effects of genotype and environment on grain yield and quality traits in bread wheat (*T. aestivum* L.). *Food Science and Technology*, 34, 386-393.

Khan, R., Gul, S., Hamayun, M., Shah, M., Sayyed, A., Ismail, H., & Gul, H. (2016). Effect of foliar application of zinc and manganese on growth and some biochemical constituents of *Brassica juncea* grown under water stress. *J. Agric. Environ. Sci.*, 16, 984-997.

Khris, B. (2021). Temps durs pour blé tendre. Liberté Algérie. <https://www.liberte-algerie.com/actualite/temps-durs-pour-ble-tendre-366054>

Kirigwi, F. M., & Saha, M. C. (2022). Screening of tall fescue genotypes for relative water content and osmotic potential under drought stress. *Grassland Research*, 1(2), 84–93.

Kourat, T., Smadhi, D., Mouhouche, B., Gourari, N., Mostafa Amin, M. G., & Bryant, C. R. (2021). Assessment of future climate change impact on rainfed wheat yield in the semi-arid Eastern High Plain of Algeria using a crop model. *Natural Hazards*, 107(3), 2175-2203.

Kugiel, P. (2022). *The impact of the war in Ukraine on the food security of developing countries* (PISM Bulletin No. 63). Polish Institute of International Affairs. <https://www.pism.pl/publications/growing-global-inequality-impact-of-the-covid-19-pandemic-on-developing-countries>

Labgaa Nadjat FN. 2018. Selection of durum wheat (*Triticum durum* Desf,) for abiotic stress tolerance, PhD Thesis, Zian Ashour University - Djelfa, Algeria.

Ladoui, K. K., Mefti, M., & Benkherbache, N. (2020). Selection of drought tolerant genotypes of barley (*Hordeum vulgare* L.) through stress tolerance indices.

Lama, S., Leiva, F., Vallenback, P., Chawade, A., & Kuktaite, R. (2023). Impacts of heat, drought, and combined heat–drought stress on yield, phenotypic traits, and gluten protein traits: capturing stability of spring wheat in excessive environments. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1179701.

Lamaoui, M., Jemo, M., Datla, R., & Bekkaoui, F. (2018). Heat and drought stresses in crops and approaches for their mitigation. *Frontiers in Chemistry*, 6, 26.

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 Agronomía Medellín*, 75(3), 10107-10118.

Larouk, C., Gabon, F., Kehel, Z., Djekoun, A., Nachit, M., & Amri, A. (2021). Chlorophyll fluorescence and drought tolerance in a mapping population of durum wheat. *Contemporary Agriculture*, 70(3-4), 123-134.

Lebart, L., Morineau, A., & Piron, M. (1995). *Statistique exploratoire multidimensionnelle* (Vol. 3). Dunod.

Leng, G., & Hall, J. W. (2020). Prediction of spatial and temporal variability of crop yields: Comparison among machine learning, regression, and mechanistic models. *Environmental Research Letters*, 15(4), 044027.

Li, Y. F., Wu, Y., Hernandez-Espinosa, N., & Peña, R. J. (2013). Heat and drought stress on durum wheat: Responses of genotypes, yield, and quality parameters. *Journal of Cereal Science*, 57(3), 398–404.

Liaqat, W., Altaf, M. T., Barutçular, C., Mohamed, H. I., Ali, Z., & Khan, M. O. (2024). Drought stress in sorghum: Physiological tools, breeding technology, omics approaches and genomic-assisted breeding—A review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 1–27.

Lipinski, B., Hanson, C., Lomax, J., et al. (2013). *Reducing food loss and waste: Creating a sustainable food future*. World Resources Institute. https://files.wri.org/d8/s3fspublic/reducing_food_loss_and_waste.pdf

Lopes, M. S., Araus, J. L., Van Heerden, P. D., & Foyer, C. H. (2011). Enhancing drought tolerance in C4 crops. *Journal of experimental botany*, 62(9), 3135-3153.

Maamri, K. (2019). *Modélisation de la productivité du blé dur en milieu semi-aride en utilisant le programme « Aqua-Crop »* [Thèse de doctorat, Université UFAS 1].

MADR, Ministry of Agriculture and Rural Development, Algeria. (2021). *Average cereal production*. <https://madr.gov.dz/?playlist=4a0503b&video=9ed131c>

MADR, Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural. (2021), Direction des Statistiques Agricoles et des Systèmes d'Information, Algérie, <https://fr.madr.gov.dz/statistiques-agricoles/>

Maghsoudi, K., Emam, Y., & Pessarakli, M. (2016). Effect of silicon on photosynthetic gas exchange, photosynthetic pigments, cell membrane stability and relative water content of different wheat cultivars under drought stress conditions. *Journal of Plant Nutrition*, 39(7), 1001-1015.

Maiorano, A., Fanchini, D., & Donatelli, M. (2014). MIMYCS: A process-based model of moisture content in developing maize kernels. *European Journal of Agronomy*, 59, 86–95.

Mansouri, A., Oudjehih, B., Benbelkacem, A., Fellahi, Z. E. A., & 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*, 2018(1), 8191749.

- Marček, T., Hamow, K. A., Végh, B., Janda, T., & Darko, E. (2019). Metabolic response to drought in six winter wheat genotypes. *PLOS ONE*, 14(2), e0212411.
- Marti, J., & Slafer, G. A. (2014). Bread and durum wheat yields under a wide range of environmental conditions. *Field Crops Research*, 156, 258–271.
- Martínez-Moreno, F., Ammar, K., & Solís, I. (2022). Global changes in cultivated area and breeding activities of durum wheat from 1800 to date: A historical review. *Agronomy*, 12(5), 1135.
- McCallum, M., Peirce, C., & Porker, K. (2019). What drives the yield gap between durum and bread wheat. 20220509413.
- Mecha, B., Alamerew, S., Assefa, A., Dutamo, D., & Assefa, E. (2017). Correlation and path coefficient studies of yield and yield associated traits in bread wheat (*Triticum aestivum L.*) genotypes. *Advances in Plants & Agriculture Research*, 6(5), 128–136.
- Mehalaine, S., & Chenchouni, H. (2021). Quantifying how climatic factors influence essential oil yield in wild-growing plants. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(13), 1257.
- Mekhlouf, A., Bouzerzour, H., Dehbi, F., & Hannachi, A. (2001). Rythme de développement et variabilité de réponses du blé dur (*Triticum durum Desf.*) aux basses températures : Tentatives de sélection pour la tolérance au gel. In *Proceedings du Séminaire sur la valorisation des milieux semi-arides* (Vol. 23, pp. 75–80).
- Mekhlouf, A., Bouzerzour, H., Benmahammed, A., Hadj Sahraoui, A., & Harkati, N. (2006). Adaptation des variétés de blé dur (*Triticum durum Desf.*) au climat semi-aride. *Sécheresse*, 17(4), 507–513.
- Mekliche, A., Hanifi-Mekliche, L., Aïdaoui, A., Gate, P. H., Bouthier, A., & Monneveux, Ph. (2015). Grain yield and its components study and their association with normalized difference vegetation index (NDVI) under terminal water deficit and well-irrigated conditions in wheat (*Triticum durum Desf.* and *Triticum aestivum L.*). *African Journal of Biotechnology*, 14(26), 2142–2148.
- Mendes, K. F., & Da Silva, A. A. (Eds.). (2022). *Applied weed and herbicide science* (pp. 157–186). Springer.
- Metz, N. (2006). *The WA guide to high moisture harvest management, grain storage and handling*. CBH Group. Mexico City, Mexico, 2012; 132p,
- Mkhabela, M. S., Bullock, P., Raj, S., et al. (2011). Forecasting crop yields using MODIS NDVI data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(3), 385–393.
- Moayed, S., Elias, E. M., & Manthey, F. A. (2021). Effect of weather on grain quality traits of durum wheat grown in the Northern Plains of USA. *American Journal of Plant Sciences*, 12(12), 1894–1911.
- Mohiy, M. M., & El-Moselhy, O. (2022). Evaluation of grain yield and its components of some bread wheat promising lines under low input conditions in upper Egypt region. *Journal of Plant Production*, 13(8), 543-548.

- Monneveux, P., Jing, R., & Misra, S. C. (2012). Phenotyping for drought adaptation in wheat using physiological traits. *Frontiers in Physiology*, 3, 429.
- Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. G. (2021). Introduction to linear regression analysis. John Wiley & Sons.
- Mosa Kareem, A., Ismail, A., & Helmy, M. (2017). Introduction to plant stresses. In *Plant stress tolerance* (pp. 1–19). Springer Briefs in Systems Biology.
- Mostafa, A., Burritt, D. J., Gupta, A., Tsujimoto, H., & Tran, L. S. P. (2020). Heat stress effects on source–sink relationships and metabolome dynamics in wheat. *Journal of Experimental Botany*, 71(2), 543–554.
- Mulvaney, M. J., & Devkota, P. J. (2020). Adjusting crop yield to a standard moisture content: SS-AGR-443/AG442, 05/2020. *Edis*, 2020(3).
- Mulubrok. (2019). *Tableau 13 : Le blé – Les graminées* [Affiche scolaire]. <https://www.mulubrok.fr/archives/2019/03/29/37208426.html>
- Mzabri, I., Charif, K., Legsayer, M., Kouddane, N., & Berrichi, A. (2017). Réponses morphophénologiques du safran (*Crocus sativus* L.) à deux stress abiotiques (hydrique et salin). *Journal of Applied Biosciences*, 117, 11651–11657.
- Nabil, B., Ghania, C., Radia, C., Aicha, A., & Leila, B. (2021). Biological and agronomic characterization of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) and barley (*Hordeum vulgare* L.) cultivated in the region of Constantine, Algeria. *South Asian Journal of Experimental Biology*, 11(5).
- Nadjim, S., Oulmi, A., Rouabhi, A., & Hafsi, M. (2017). Relationship between grain yield, agronomic traits and carbon isotope discrimination in durum wheat cultivated under semi-arid climate. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 20(4), 1068-1077.
- Nampila, R., Choechaiyaphum, C., Isarangkool Na Ayutthaya, S., Yungyuen, P., Meetha, S., & Techawongstien, S. (2016, September). Using a chlorophyll meter (SPAD-502) to estimate the total chlorophyll and nitrogen contents in leaves of Manee-Esan'pummelo. In *II Asian Horticultural Congress 1208* (pp. 325-332).
- NASA. (2025). POWER | Prediction of Worldwide Energy Resources. Retrieved February 2, 2025, from <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- Nazir, H., Gul, H., Rauf, M., Yaseen, T., Rahman, K. U., Khan, Y., & Noor, M. (2021). Response of wheat varieties to salinity: Growth, yield and ion analysis. *Plant Science Today*, 8(2), 301–311.
- Nezhadahmadi, A., Prodhan, Z. H., & Faruq, G. (2013). Drought tolerance in wheat. *The Scientific World Journal*, 610721.
- Nishiyama, Y., Allakhverdiev, S. I., & Murata, N. (2006). A new paradigm for the action of reactive oxygen species in the photoinhibition of photosystem II. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics*, 1757(7), 742–749.

- Noura, M., Laid, B., Hammema, B., Ammar, B., & Faiçal, B. (2021). Agronomic and Morpho-Physiological Characterization of Some Advanced Lines being Selected in Durum Wheat Cultivated in Semi-Arid Conditions. *Food Science and Engineering*, 65-78.
- Odjo, S., Malumba, P., Dossou, J., Janas, S., & Béra, F. (2012). Influence of drying and hydrothermal treatment of corn on the denaturation of salt-soluble proteins and color parameters. *Journal of Food Engineering*, 109(3), 561–570.
- ONM, Office National de la Météorologie. (2023). Site officiel de l'Office National de la Météorologie. <https://www.meteo.dz/home>
- Orlando, R., Górný, A. G., & Gawroński, P. (2021). Modelling the growth, development and yield of *Triticum durum* Desf. under northeastern European conditions. *Scientific Reports*, 11, 22149.
- Othmani, A., Ayed, S. O., Chamekh, Z., Slama-Ayed, O., Teixeira da Silva, J. A., Rezgui, M., & Younes, M. B. (2021). Screening of seedlings of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivars for tolerance to PEG-induced drought stress. *Pakistan Journal of Botany*, 53(3), 823–832.
- Ould Amer, S., Aliat, T., Kucher, D. E., Bensaci, O. A., & Rebouh, N. Y. (2023). Investigating the potential of arbuscular mycorrhizal fungi in mitigating water deficit effects on durum wheat (*Triticum durum* Desf.). *Agriculture*, 13(3), 552.
- Oulmi, A., Frih, B., Guendouz, A., & Benkadja, S. (2022). Effect of sowing date on grain yield, its components and some morpho-phenological traits of durum wheat (*Triticum durum* desf.) in semi-arid zone in Algeria. *International Journal of Bio-resource and Stress Management*, 13(3), 226-234.
- Oumata, S., Monneveux, P., Zaharieva, M., Mekliche-Hanifi, L., & David, J. (2023). Variation of morphological traits among wheat (*Triticum aestivum* L.) landraces from two regions of the Algerian Sahara. Potential interest for wheat breeding. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 70(1), 235-250.
- Parvej, M. R., Holshouser, D. L., Kratochvil, R. J., et al. (2020). Early high-moisture wheat harvest improves double-crop system: I. Wheat yield and quality. *Crop Science*, 60(5), 2633–2649.
- Parvej, M. R., Hurlburgh, C. R., Hanna, H. M., & Licht, M. A. (2020). Dynamics of corn dry matter content and grain quality after physiological maturity. *Agronomy Journal*, 112(2), 998–1011.
- Pask, A. J. D., Pietragalla, J., Mullan, D. M., & Reynolds, M. P. (2013). *Physiological breeding II: A field guide to wheat phenotyping*. CIMMYT.
- Patil, A., & Ram, M, (2024), Breeding for heat stress tolerance in wheat: A review, *Journal of Advances in Biology & Biotechnology*, 27(7), 227-237,
- Paul, P., & Lindsey, L. (2014). Late-season wheat grain quality concerns. *Agronomic Crops Network*, Ohio State University Extension.
- Pearson, K. (1895). VII. Note on regression and inheritance in the case of two parents.

Proceedings of the Royal Society of London, 58(347–352), 240–242.

Pennington, D., & Falor, J. (2023). Evaluating freeze injury in wheat. *Michigan State University Extension*.

Pour-Aboughadareh, A., Mohammadi, R., Etminan, A., Shooshtari, L., Maleki-Tabrizi, N., & Poczai, P. (2020). Effects of drought stress on some agronomic and morpho-physiological traits in durum wheat genotypes. *Sustainability*, 12(14), 5610,

Prasch, C. M., & Sonnewald, U. (2013). Simultaneous application of heat, drought, and virus to *Arabidopsis* plants reveals significant shifts in signaling networks. *Plant physiology*, 162(4), 1849–1866.

Prathap, V., Ali, K., Singh, A., Vishwakarma, C., Krishnan, V., Chinnusamy, V., & Tyagi, A. (2019). Starch accumulation in rice grains subjected to drought during grain filling stage. *Plant Physiology and Biochemistry*, 142, 440–451.

Qaseem, M. F., Qureshi, R., & Shaheen, H. (2019). Heat and their combination on the growth, yield and physiology of diverse wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes varying in sensitivity to heat and drought stress. *Scientific Reports*, 9, 6955.

Qiao, M., Hong, C., Jiao, Y., Hou, S., & Gao, H. (2024). Impacts of drought on photosynthesis in major food crops and the related mechanisms of plant responses to drought. *Plants*, 13(13), 1808.

Qu, L., Gu, X., Li, J., Guo, J., & Lu, D. (2023). Leaf photosynthetic characteristics of waxy maize in response to different degrees of heat stress during grain filling. *BMC Plant Biology*, 23(1), 469.

Rabti, A. (2021). *Changements des caractères morpho-physiologiques induits par la sélection artificielle du blé dur (*Triticum durum* Desf.) en Algérie* [Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas Sétif 1].

Rabti, A. B., Mekaoussi, R., Fellahi, Z. E. A., Hannachi, A., Benbelkacem, A., Benmohammed, A., & Bouzerzour, H. (2020). Characterization of old and recent durum wheat [*Triticum turgidum* (L.) Tell. convar. *durum* (Desf.) Mackey] varieties assessed under south Mediterranean conditions. *Egyptian Journal of Agronomy*, 42(3), 307–320.

Rahal, F., & Tahri, K. (2022). Modeling of wheat's food gap in Algeria using the Autoregressive Distributed Lag (ARDL). *Revue des Économies Financières Bancaires et de Management*, 11(1), 887–908.

Rebetzke, G. J., Rattey, A. R., Farquhar, G. D., Richards, R. A., & Condon, A. G. (2013). Genomic regions for canopy temperature and their genetic association with stomatal conductance and grain yield in wheat. *Functional Plant Biology*, 40(1), 14–33. <https://doi.org/10.1071/FP12184>

Reidy, J. (2024). Algeria's wheat imports to remain elevated. *World Grain*. <https://www.world-grain.com/articles/19582-algerias-wheat-imports-to-remain-elevated>

Roncallo, P. F., Guzmán, C., Larsen, A. O., Achilli, A. L., Dreisigacker, S., Molfese, E., ... & Echenique, V. (2021). Allelic variation at glutenin loci (Glu-1, Glu-2 and Glu-3) in a worldwide

- durum wheat collection and its effect on quality attributes. *Foods*, 10(11), 2845.
- Rozbicki, J., Ceglińska, A., Gozdowski, D., Jakubczak, M., Cacak-Pietrzak, G., Mądry, W., ... & Drzazga, T. (2015). Influence of the cultivar, environment and management on the grain yield and bread-making quality in winter wheat. *Journal of cereal science*, 61, 126-132.
- Ruel, T. (2006). *Document sur la culture du blé*. Éditions Educagri.
- Sabella, E., Aprile, A., Negro, C., Nicolì, F., Nutricati, E., Vergine, M., ... & De Bellis, L. (2020). Impact of climate change on durum wheat yield. *Agronomy*, 10(6), 793.
- Saeidi, M., & Abdoli, M. (2015). Effect of drought stress during grain filling on yield and its components, gas exchange variables, and some physiological traits of wheat cultivars. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 17(4), 885–898.
- Sahri, A., Chentoufi, L., Arbaoui, M., Muller, M. H., Belqadi, L., & Birouk, A. (2014). Impact du relief et des circuits semenciers locaux sur la diversité agro-morphologique du blé dur (*Triticum turgidum* ssp. *durum*) dans la vallée d'Er Rich–Imilchil (Maroc). *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, 2(2).
- Saidi, A. (2018). Comparative study for tolerance to water stress in some varieties of durum wheat (*Triticum durum* Desf.). Mohamed Boudiaf University of M'Sila, Algeria.
- Saleem, A., Roldán-Ruiz, I., Aper, J., & Muylle, H. (2022). Genetic control of tolerance to drought stress in soybean. *BMC Plant Biology*, 22(1), 615.
- Sall, A., Chiari, T., Legesse, W., Seid-Ahmed, K., Ortiz, R., Van Ginkel, M., & Bassi, F. M. (2019). Durum wheat (*Triticum durum* Desf.): Origin, cultivation and potential expansion in Sub-Saharan Africa. *Agronomy*, 9, 263.
- Salmi, M., Haddad, L., Oulmi, A., Benmhammed, A., et Benbelkacem, A., 2015, Variabilité phénotypique et sélection des caractères agronomiques du blé dur (*triticum durum* Desf,) Sous conditions semi-arides, European Scientific Journal, 11(21): 99-111,
- Scariot, M. A., Radiünz, L. L., Dionello, R. G., et al. (2018). Quality of wheat grains harvested with different moisture contents and stored in hermetic and conventional systems. *Journal of Stored Products Research*, 75, 29–34.
- Schuhwerk, D., Nakhforoosh, A., Kutschka, S., Bodner, G., & Grausgruber, H. (2011). Field-screening of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) for drought tolerance (pp. 147-154).
- Sebbane, M. (2021). *Opportunités d'amélioration de la production de blé dur en zone à contrainte hydrique* [Thèse de doctorat LMD, Université non précisée].
- Seleiman, M. F., Al-Suhaibani, N., Ali, N., Akmal, M., Alotaibi, M., Refay, Y., & Battaglia, M. L. (2021). Drought stress impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects. *Plants*, 10(2), 259.
- Selt, M. M. (2025). The wheat sector in Algeria facing the challenges of food security. *مجلة إضافات اقتصادية*, 9(1), 677–694.

- Semcheddine, N. (2015). *Évaluation de la tolérance à la sécheresse chez le blé dur (Triticum durum Desf.) par l'étude du bilan hydrique et des paramètres phéno-morpho-physiologiques* (Thèse de doctorat, Université Farhat Abbas Sétif 1, Algérie, 46 p.).
- Semcheddine, N. (2020). Agronomical and Physiological Behavior of Durum Wheat (Triticum durum Desf.) Genotypes Under Semi-Arid Conditions.
- Serra, H., Svačina, R., Baumann, U., et al. (2021). Ph2 encodes the mismatch repair protein MSH7-3D that inhibits wheat homoeologous recombination. *Nature Communications*, 12, 803.
- Shah, S, M, D, M,, Shabbir, G,, Malik, S, I,, Raja, N, I,, Shah, Z, H,, Rauf, M,, ,,, & Yang, S, H, (2022), Delineation of physiological, agronomic and genetic responses of different wheat genotypes under drought condition, *Agronomy*, 12(5), 1056,
- Sharma, N., & Singh, R. (2023). Photosystems under high light stress: Throwing light on mechanism and adaptation. *Photosynthetica*, 61(SI), 247–260.
- 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.
- Sintim, H. Y., Zheljazkov, V. D., Obour, A. K., & Garcia y Garcia, A. (2016). Managing harvest time to control pod shattering in oilseed camelina. *Agronomy Journal*, 108(2), 656–661.
- Sissons, M. (2008). Role of durum wheat composition on the quality of pasta and bread. *Food*, 2(2), 75–90.
- Slama, A., Mallek-Maalej, E., Ben Mohamed, H., Rhim, T., & Radhouane, L. (2018). A return to the genetic heritage of durum wheat to cope with drought heightened by climate change. *PLOS ONE*, 13(5), e0196873.
- Sofia, H., Hamenna, B., Amar, B., Abdelmalek, O., Kenza, K., & Dalila, A. Déterminisme génétique des caractères morpho-physiologiques liés au rendement chez le blé dur en zone semi-aride des hauts plateaux sétifiens, algérie.
- Soltner, D. (1998). *Les grandes productions végétales : Céréales, plantes sarclées, prairies* (19^e éd.). Éditions Sciences et Techniques Agricoles.
- Spagnoletti-Zeuli, T. L., & Qualset, P. O. (1990). Flag leaf variation and the analysis of diversity in durum wheat. *Plant Breeding*, 105, 189–202.
- Suliman, M. S. E., Elradi, S. B. M., Zhou, G., Meng, T., Zhu, G., Xu, Y., & Ahmad, I. (2024). Exogenous glutathione protected wheat seedling from high temperature and water deficit damages. *Scientific Reports*, 14(1), 5304.
- Sun, C., Lv, T., Huang, L., Liu, X., Jin, C., & Lin, X. (2020). Melatonin ameliorates aluminum toxicity through enhancing aluminum exclusion and reestablishing redox homeostasis in roots of wheat. *Journal of Pineal Research*, 68(4), e12642.
- Sun, M., Peng, F., Xiao, Y., Yu, W., Zhang, Y., & Gao, H. (2020). Exogenous phosphatidylcholine treatment alleviates drought stress and maintains the integrity of root cell membranes in peach. *Scientia Horticulturae*, 259, 108821.
- Tan, S., Sha, Y., Sun, L., & Li, Z. (2023). Abiotic stress-induced leaf senescence: Regulatory

mechanisms and application. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(15), 11996.

Tang, X., Liu, H., Feng, D., Zhang, W., Chang, J., Li, L., & Yang, L. (2022). Prediction of field winter wheat yield using fewer parameters at middle growth stage by linear regression and the BP neural network method. *European Journal of Agronomy*, 141, 126621.

Tardieu, F., Simonneau, T., & Muller, B. (2018). The physiological basis of drought tolerance in crop plants : a scenario-dependent probabilistic approach. *Annual review of plant biology*, 69, 733-759.

Tedone, L., Ali, S. A., & De Mastro, G. (2018). Optimization of Nitrogen in Durum Wheat in the Mediterranean Climate: The Agronomical Aspect and Greenhouse Gas (GHG) Emissions,

Tefera, A., Kebede, M., Tadesse, K., & Getahun, T. (2021). Morphological, physiological, and biochemical characterization of drought-tolerant wheat (*Triticum* spp.) varieties. *International Journal of Agronomy*, 2021, Article 2021.

Teng, Z., Chen, Y., Meng, S., Duan, M., Zhang, J., & Ye, N. (2023). Environmental stimuli: A major challenge during grain filling in cereals. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(3), 2255.

The Angiosperm Phylogeny Group. (2016). An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG IV. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 181(1), 1–20.

Thomas, S. H., Warburton, M. L., & Harlan, J. R. (1975). *Harlan's corps and man*. John Wiley and Sons.

Tihanov, G., Dallev, M., Hristova, G., & Mitkov, I. (2021). Loss of grain at harvesting wheat with a combine harvester.

Tilley, M., Chen, Y. R., & Miller, R. A. (2012). Wheat breeding and quality evaluation in the US. In *Breadmaking* (pp. 216–236). Woodhead Publishing.

Tissaoui, S., Mougou-Hamdane, A., Omri-BenYoussef, N., & Nasraoui, B. (2022). Variability of Pyrenophora tritici-repentis isolated from different wheat areas of Tunisia: morpho-cultural characterization, pathogenic analysis and virulence effector genes. *Archives of Phytopathology and Plant Protection*, 55(1), 44-62.

Trad, H., Ayed, S., Teixeira da Silva, J., Othmani, A., Bouhaouel, I., Helel, R., & Slim-Amara, H. (2022). Quality assessment of durum wheat landraces and modern varieties through physico-chemical properties. *IOSR J. Agric. Vet. Sci*, 15, 56-67.

Tumová, L., Tarkowská, D., Říhová, K., Marková, H., Kočová, M., Rothová, O., Čečetka, P., & Holá, D. (2018). Drought-tolerant and drought-sensitive genotypes of maize (*Zea mays* L.) differ in contents of endogenous brassinosteroids and their drought-induced changes. *PLoS ONE*, 13, e0197870.

Tutiempo, 2025, Site météorologique mondiale, <https://fr.tutiempo.net>, consulté le 02 février 2025,

Ulfat, A., Majid, S. A., & Hameed, A. (2017). Hormonal seed priming improves wheat (*Triticum aestivum* L.) field performance under drought and non-stress conditions. *Pakistan Journal of Botany*, 49(4), 1239–1253.

Ullah, A., Nadeem, F., Nawaz, A., Siddique, K. H., & Farooq, M. (2022). Heat stress effects on the reproductive physiology and yield of wheat. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 208(1), 1–17.

USDA Foreign Agricultural Service. (2024). *World agricultural production* (Rapport mensuel). <https://www.fas.usda.gov/sites/default/files/2024-05/production.pdf>

Vardharajula, S., Zulfikar Ali, S., Grover, M., Reddy, G., & Bandi, V. (2011). Drought-tolerant plant growth promoting *Bacillus* spp.: effect on growth, osmolytes, and antioxidant status of maize under drought stress. *Journal of Plant Interactions*, 6(1), 1-14.

Wach, D., & Skowron, P. (2022). An overview of plant responses to drought stress at morphological, physiological and biochemical levels. *Polish Journal of Agronomy*, 50, 25–34.

Wang, K., & Fu, B. X. (2020). Inter-relationships between test weight, thousand kernel weight, kernel size distribution and their effects on durum wheat milling, semolina composition and pasta processing quality. *Foods*, 9(9), 1308.

Wang, K., Xie, R., Ming, B., et al. (2021). Review of combine harvester losses for maize and influencing factors. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 14(1), 1–10.

Wang, L., Bai, X., Qiao, Y., Si, L., Yu, Z., Ni, C., ... & Xiao, K. (2023). tae-miR9674a, a microRNA member of wheat, confers plant drought and salt tolerance through modulating the stomata movement and ROS homeostasis. *Plant Biotechnology Reports*, 17(4), 471–488.

Wang, Y., Qiao, L., Yang, C., Li, X., Zhao, J., Wu, B., ... & Zheng, J. (2022). Identification of genetic loci for flag-leaf-related traits in wheat (*Triticum aestivum* L.) and their effects on grain yield. *Frontiers in Plant Science*, 13, 990287.

Wasaya, A., Manzoor, S., Yasir, T. A., Sarwar, N., Mubeen, K., Ismail, I. A., & El Sabagh, A. (2021). Evaluation of fourteen bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes by observing gas exchange parameters, relative water and chlorophyll content, and yield attributes under drought stress. *Sustainability*, 13(9), 4799.

Wen, P., Meng, Y., Gao, C., Guan, X., Wang, T., & Feng, W. (2023). Field identification of drought tolerant wheat genotypes using canopy vegetation indices instead of plant physiological and biochemical traits. *Ecological Indicators*, 154, 110781.

Willmott, C. J., & Matsuura, K. (2005). Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate Research*, 30(1), 79–82.

Willmott, C. J., Akleson, G. S., Davis, R. E., et al. (1985). Statistic for the evaluation and comparison of models. *Journal of Geophysical Research*, 90(C5), 8995–9005.

Wilmer, H. (2019). *Feiffer Grain Tablet: Dropping a tab. Profi.* https://cdn.shopify.com/s/files/1/0577/2132/3554/files/Profi_-

Grain Tablet en..pdf?v=1707912689

- World Integrated Trade Solution (WITS). (2023). Cereals; durum wheat imports by country [Base de données]. *World Integrated Trade Solution*. <https://wits.worldbank.org/trade/comtrade/en/country/ALL/year/2021/tradeflow/Imports/partner/WLD/product/100110>
- Xie, R. Z., Lei, X. P., Wang, K. R., Guo, Y. Q., Chai, Z. W., Hou, P., & Li, S. K. (2014). Research on corn mechanically harvesting grain quality in Huanghuaihai Plain. *Crops*, 2, 76–79.
- Xynias, I. N., Mylonas, I., Korpetis, E. G., Ninou, E., Tsaballa, A., Avdikos, I. D., & Mavromatis, A. G. (2020). Durum wheat breeding in the Mediterranean region: Current status and future prospects. *Agronomy*, 10(3), 432.
- Yadav, M. R., Choudhary, M., Singh, J., Lal, M. K., Jha, P. K., Udwat, P., ... & Prasad, P. V. (2022). Impacts, tolerance, adaptation, and mitigation of heat stress on wheat under changing climates. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(5), 2838.
- Yan, B., Guo, S., Liang, J., & Sun, H. (2015). The generalized Nash model for river flow routing. *Journal of Hydrology*, 530, 79–86.
- Yang, X., Lu, M., Wang, Y., Wang, Y., Liu, Z., & Chen, S. (2021). Response mechanism of plants to drought stress. *Horticulturae*, 7(3), 50.
- Yara France. (2023). *Optimiser la qualité du blé par la fertilisation et la récolte*. <https://www.yara.fr>
- Yasir, T. A., Min, D., Chen, X., Condon, A. G., & Hu, Y. G. (2013). The association of carbon isotope discrimination (Δ) with gas exchange parameters and yield traits in Chinese bread wheat cultivars under two water regimes. *Agricultural Water Management*, 119, 111-120.
- Yue, J., Feng, H., Li, Z., Zhou, C., & Xu, K. (2021). Mapping winter-wheat biomass and grain yield based on a crop model and UAV remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 42(5), 1577-1601.
- Zewdu, D., Mekonnen, F., & Geleta, N. (2024). Correlation and path analysis for yield and yield component traits on bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes. *International Journal of Bio-Resource and Stress Management*, 15(1), 1-13.
- Zhang, H., Wang, Y., Yu, S., Zhou, C., Li, F., Chen, X., Liu, L., & Wang, Y. (2023). Plant photosynthesis and dry matter accumulation response of sweet pepper to water–nitrogen coupling in cold and arid environment. *Water*, 15(11), 2134.
- Zhang, W., Wang, J., Huang, Z., Mi, L., Xu, K., Wu, J., ... & Jiang, D. (2019). Effects of low temperature at booting stage on sucrose metabolism and endogenous hormone contents in winter wheat spikelet. *Frontiers in Plant Science*, 10, 498.