

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

-المدرسة الوطنية العليا للفلاحة الحراش – الجزائر-

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE EL-HARRACH –ALGER-

Thèse

En vue de l'obtention du diplôme de doctorat 3ème cycle LMD en sciences
agronomiques

Département : Productions végétales

Spécialité : Amélioration des productions végétales et agriculture durable

THEME

**Etude éco-physiologique, agronomique, physico-
chimique et génétique d'une collection de blé dur**

Présentée par : M^{lle}. BEKADDOUR Hassiba

Devant le jury :

Président : M. KHELIFI L.

Professeur, ENSA, Alger

Directrice de thèse : M^{me}. BENKHERBACHE N.

Professeur, Université Mohamed Boudiaf, M'sila

Co-directeur de thèse : M. BENBELKACEM A.

Directeur de recherche, INRA, Constantine

Examineurs : M. MEFTI M.

Professeur, ENSA, Alger

M. BENNIOU R.

Professeur, Université Mohammed Boudiaf, M'sila

M.FELLAHI Z.E.A

M.C.A, Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi,
Bordj Bou Arreridj

Invitée : M^{me}. DJENADI C.

INRA, Alger

Année universitaire 2025-2026

Table des matières

Liste des abréviations.....	10
Liste des tableaux	11
Liste des figures	12
Introduction générale.....	1
Partie I : Synthèse bibliographique	6
1. Généralités sur le blé dur.....	6
1.1. Origine du blé	6
1.1.1. Histoire génétique et évolution	6
1.1.2. Zones d'origines et de dispersion	6
2. Importance de la culture de blé dur	7
3. Taxonomie, description botanique et exigences du blé dur	9
4. Composition biochimique du grain de blé dur	10
5. Ressources phylogénétiques et conservation du blé dur	11
5.1. Ressources génétique du blé dur in-situ	11
5.2. Ressources génétiques du blé dur ex-situ	12
6. Variabilité génétique du blé dur	14
6.1. Caractères phénotypiques.....	14
6.2. Les marqueurs physico-chimiques.....	17
6.3. Les marqueurs biochimiques	19
6.4. Les marqueurs moléculaires.....	19
6.4.1. Sélection assisté par marqueur (SAM).....	20
6.4.2. Analyse d'association marqueur-trait par GWAS.....	21
7. Notion d'interaction génotype x environnement (G x E)	22
7.1. Avantages et limites de l'interaction génotype x environnement en sélection	23
7.2. Notion de stabilité.....	23
7.3. Application du modèle AMMI pour l'analyse G x E	24
8. Stratégie ou efforts d'amélioration de la culture de blé en Algérie	25
Partie II : Expérimentation	26
Chapitre 1 : Caractérisation agro-morphologique d'une collection de blé dur et analyse d'interaction entre génotype et environnement.....	27
1. Introduction	26
2. Matériels et méthodes.....	28
2.1. Description des sites expérimentaux.....	28
2.2. Conditions édaphiques	29

2.3.	Conditions climatiques	30
2.4.	Matériel végétal	34
2.5.	Dispositif expérimental	35
2.6.	Conduite de l'essai	37
2.7.	Paramètres et mesures	37
2.8.	Traitement des données	40
3.	Résultats	42
3.1.	Description de la variabilité phénotypique d'une collection de blé dur dans deux sites différents.....	42
3.2.	Analyse des paramètres génétiques	68
3.3.	Etude des corrélations entre les paramètres mesurés	70
3.4.	Analyse du rendement en grain par le modèle AMMI et l'indice AWAI.....	73
3.5.	Indice de stabilité multi-traits (MTSI).....	77
4.	Discussion	79
5.	Conclusion	90
Chapitre 2 : Caractérisation physico-chimique d'une collection de blé dur		91
1.	Introduction	90
2.	Matériels et méthodes.....	92
2.1.	Matériel végétal	92
2.2.	Paramètres mesurés	92
2.3.	Traitement des données	98
3.	Résultats	100
3.1.	Description de la variabilité physico-chimique de la collection du blé dur.....	100
3.2.	Analyse des paramètres génétiques	109
3.3.	Analyse en composante principale (ACP)	110
3.4.	Classification Ascendante Hiérarchique (CAH).....	112
3.5.	Matrice de corrélation.....	114
3.6.	Indice de distance génotype-idéotype multi-traits (MGIDI)	114
4.	Discussion	117
5.	Conclusion	123
Chapitre 3 : Evaluation de la variabilité génétique d'une collection de blé dur par les marqueurs moléculaires SNPs		124
1.	Introduction	123
2.	Matériels et méthodes.....	125
2.1.	Matériel Végétal.....	125
2.2.	Extraction d'ADN, quantification et qualité	125

2.3.	Génotypage par les marqueurs SNPs	126
2.4.	Traitement des données	126
3.	Résultats	129
3.1.	Distribution, taille génomique et contenu d'information en polymorphisme des SNPs.....	129
3.2.	Décroissance de déséquilibre de liaison	130
3.3.	Analyse de la structure de population	131
3.4.	Estimation des indices de diversité génétique des populations.....	134
3.5.	Analyse de la variance moléculaire (AMOVA).....	134
3.6.	Analyse phylogénétique.....	135
3.7.	Etude d'association marqueur-trait (GWAS).....	136
3.8.	Détection des gènes/QTLs	141
4.	Discussion	143
5.	Conclusion	150
	Conclusion générale et perspectives.....	151
	Références bibliographiques.....	155
	Annexes	173

المخلص

الهدف من هذه الدراسة هو تقييم التنوع الوراثي لمجموعة مكونة من 125 صنف من القمح الصلب (*Triticum durum* Desf.) من أصول مختلفة، بما في ذلك الأصناف المحلية، القديمة والجديدة، وذلك باستخدام التحليل المظهري والجزيئي. تم إجراء على الاجمال أربع تجارب تحت الظروف الطبيعية في موقعين بمناخات مختلفة، وذلك خلال موسمي 2019/2018 و 2021/2020 لموقع قسنطينة وموسمي 2021/2020 و 2022/2021 لموقع الجزائر العاصمة وذلك من أجل تقييم سلوك وأداء الأنماط الجينية على أساس العوامل الفينولوجية، الفيزيولوجية والمورفولوجية الزراعية. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن أصناف ICARDA: 2* Icarasha و Ter-1//Mrf1/Stj2، اتسمت بالدورة النباتية المبكرة في كلا الموقعين، في حين تميزت الأصناف الجزائرية المحلية وكلا الصنفين Kebir و Senatore-capelli بالتسبيل المتأخر وارتفاع طول الساق. أظهر الصنفان Gemgoum Rkhem و GR Iran ارتفاع وزن الألف حبة وكذا عدد السنبيلات الخصبة في كلا الموقعين. بالإضافة إلى الصنفين Altar 84 , Omrabi5 اللذان اظهرا نسبة عالية من الكلوروفيل. حدد تحليل تفاعل النمط الجيني × البيئة، باستخدام نموذج AMMI للمحصول، بالإضافة إلى مؤشر القدرة على التكيف AWAI ومؤشر MTSI للاستقرار، العديد من الأنماط الجينية المشتركة في كلا النهجين، مثل 98,18,C1, C2, C3, C4, C5, 100,120,99، وتميزت هذه الاصناف الوراثية بإنتاجيتها العالية واستقرارها العالي من حيث العوامل المرتبطة بالإنتاجية. من المنظور الفيزيوي- كيميائي، وبهدف تقييم الجودة التكنولوجية للحبوب في مجموعة القمح الصلب، حددت النتائج تسعة عشر نمطًا وراثيًا واعدًا باستخدام مؤشر MGIDI، مما يعكس الخصائص المطلوبة في صناعة المعكرونة. وتسلط النتائج الضوء أيضا على إمكانات الأصناف الجزائرية المحلية، ولا سيما Guemgoum Rkhem, Bidi 17, Oued Zenati, Djenah-khettifa, و Gloire de Mongolfier. تتميز هذه الأصناف بمحتواها العالي من البروتين، والغلوتين، وحجم الترسيب العالي. من المنظور الجزيئي، كشفت مؤشرات SNP المستخدمة لدراسة تنوع مجموعة مكونة من 4 9 نمط وراثي من القمح الصلب ان معظم التباين الوراثي كان داخل المجموعات وليس بينها وذلك بسبب التدفق الجيني العالي. أتاح تحليل GWAS تحديد 27 SNPs مرتبطة ببعض الصفات المهمة التي تمت دراستها، بما في ذلك ثلاثة منها ذات تأثير متعدد الصفات. ارتبط اثنان بشكل مباشر مع طول الساق والسويقة بينما ارتبط الثالث بالتسبيل المبكر وخصوبة السنبلة. كشفت النتائج أيضا، ان المؤشرات التي تم تحديدها في موقع الجزائر العاصمة كانت مرتبطة بصفات الإنتاج والتكيف في حين ان تلك المكتشفة في قسنطينة كانت مرتبطة بالتكيف. تم تحديد الجينات المرشحة لطول الساق والسويقة لكلا الموقعين والتي تعتبر جينات مستقرة، في حين تم اكتشاف الجينات المرشحة لوزن الالف حبة وكذا عدد السنبيلات الخصبة والتسبيل المبكر ويعتبر محددًا. تسهل هذه النتائج عمل المحسِنون الوراثيون من خلال تمكينهم من استهداف المواقع المحددة في برامج تحسين القمح بشكل مباشر.

الكلمات الرئيسية: التنوع الوراثي، استقرار المحصول، تفاعل النمط الجيني مع البيئة، جودة، مؤشر GWAS، SNPs الجينات المرشحة.

Abstract

The aim of this study is to assess the genetic diversity of a collection of 125 durum wheat (*Triticum durum* Desf.) genotypes from different origins, including local varieties, old and new using a combined phenotypic and molecular analysis. A total of four trials were conducted under rainfed conditions on two sites with different climates, in particular during the 2018/2019 and 2020/2021 crop years for the Constantine site and during the 2020/2021 and 2021/2022 crop years for the Algiers site, based on phenological, morphological, physiological and agronomical parameters. The results obtained showed that the ICARDA genotypes 'Icarasha*2' and 'Ter-1//Mrf1/Stj2' exhibited the earliest vegetative cycle at both locations, while the local Algerian varieties and the Senatore-cappelli and Kebir genotypes demonstrated a late vegetative cycle and a long plant height. The varieties GR Iran and Guemgoum Rkhem exhibited a high thousand-kernel weight, number of fertile spikelets/spike and number of kernels/spike at both sites, while the varieties Omrabi5 and Altar84 demonstrated a high chlorophyll content at both sites. The analysis of the genotype x environment interaction, based on the grain yield results obtained with the AMMI model and its adaptability index AWAI, and the analysis of the stability and performance of the parameters via the MTSI index, identified several genotypes in common to both methods. These were C1 and 98 and 99 (ICARDA), C2, C4 and 31 (Algeria), C5, C3 and 120 (CIMMYT), 100 (Mexico) and 18 (Syria). These genotypes were distinguished by their high yields and high performance and stability in terms of yield-related parameters. From a physico-chemical perspective, with the aim of assessing the technological quality of the grains in the durum wheat collection, the results identified nineteen promising genotypes using the MGIDI index, reflecting characteristics sought after in the pasta-making industry. The results also highlight the potential of local Algerian varieties, notably Guemgoum Rkhem, Bidi 17, Oued Zenati, Djenah-khettifa and Gloire de Montgolfier. These varieties stand out for their high protein content, high-quality gluten, high sedimentation volume and high vitreousness. At the molecular level, the analysis of SNP markers used to characterize the structure of the 94 durum wheat genotypes revealed that genetic variability was predominantly found within populations rather than between them, likely due to high gene flow. GWAS association analysis identified 27 significant SNPs associated with several phenotypic traits, including three with pleiotropic effects. Two of these SNPs were directly linked to plant height and peduncle length, while the third was associated with both earliness and spike fertility. The SNPs identified in Algiers were primarily associated with traits related to production and adaptation, whereas those detected in Constantine were linked to adaptation mechanisms. Candidate genes associated with plant height and peduncle length were identified at both sites, suggesting their stability. In contrast, candidate genes linked to TKW, plant height, spike fertility and heading date appear to be specific to certain environmental conditions. These results facilitate the work of breeders by enabling them to directly target the loci identified in wheat improvement programmes.

Keywords: genetic diversity, genotype x environment interaction, stability, quality, SNPs, GWAS, gènes candidats.

Résumé

L'objectif de cette étude repose sur une évaluation de la diversité génétique d'une collection de 125 génotypes de blé dur (*Triticum durum* Desf.) issus de différentes origines, incluant des variétés locales, anciennes et nouvelles, à travers une analyse combinée, phénotypique et moléculaire. Quatre essais ont été menés sous conditions pluviales sur deux sites différents. Pour le site de Constantine, ils ont été réalisés durant les campagnes agricoles 2018/2019 et 2020/2021, tandis que pour le site d'Alger ils ont été réalisés durant les campagnes agricoles 2020/2021 et 2021/2022. L'étude s'est basée sur le suivi des paramètres phénologiques, morphologiques, physiologiques et agronomiques. Les résultats obtenus ont montré que les génotypes « Icarasha*2 » et « Ter-1//Mrf1/Stj2 » de l'ICARDA se sont distingués par leur cycle végétatif le plus précoce, dans les deux sites, tandis que les variétés locales algériennes et les génotypes Senatore-cappelli et Kebir se sont caractérisées par leur tardivité et la longue hauteur de la tige. Les variétés, GR Iran et Gemgoum Rkhem ont présenté un poids de mille grains, un nombre d'épillets fertiles/épi et un nombre de grains/épi élevés dans les deux sites, de plus les variétés Omrabi5 et Altar84 ont affiché une teneur élevée en chlorophylle sur les deux sites. A l'issue des résultats obtenus et en se basant sur ceux relatifs au rendement en grains, l'évaluation de l'interaction génotype × environnement a été réalisée selon le modèle AMMI et son indice d'adaptabilité AWAI et l'analyse de la stabilité et de performance des paramètres via l'indice MTSI. Plusieurs génotypes ont été identifiés simultanément par les deux méthodes. Il s'agit de C1 et 98 et 99 (ICARDA), C2, C4 et 31 (Algérie), C5, C3 et 120 (CIMMYT), 100 (Mexique) ainsi que 18 (Syrie). Ces génotypes se sont distingués par leur rendement élevé et leur grande performance et stabilité par rapport aux paramètres liés au rendement. Sur le plan physico-chimique, visant à évaluer la qualité technologique des grains de la collection de blé dur, les résultats ont permis d'identifier dix-neuf génotypes prometteurs grâce à l'indice MGIDI, reflétant des caractéristiques recherchées dans l'industrie de fabrication des pâtes. Ces résultats mettent, également, en évidence le potentiel des variétés locales algériennes, notamment Guemgoum Rkhem, Bidi 17, Oued Zenati, Djenah-khettifa et Gloire de Montgolfier. Ces variétés se sont distinguées par leur forte teneur en protéines, la qualité du gluten, leur volume de sédimentation élevé et leur vitrosité. Sur le plan moléculaire, les marqueurs SNPs utilisés pour étudier la structure de la collection de 94 génotypes de blé dur ont révélé que la majeure partie de la variabilité génétique se situe au sein des populations plutôt qu'entre elles, en raison d'un flux génétique élevé. L'analyse d'association GWAS a permis d'identifier 27 SNPs significatifs liés à certains paramètres phénotypiques étudiés, dont trois présentant un effet pléiotropique. Deux de ces SNPs étaient directement liés à la hauteur de la plante et la longueur du col de l'épi, tandis que le troisième était associé à la précocité et à la fertilité de l'épi. Les SNPs identifiés au site d'Alger semblent être associés à des traits liés à la production et à l'adaptation et ceux détectés à Constantine ont été liés à des traits impliqués dans les mécanismes d'adaptation. Des gènes candidats liés à la hauteur de la plante et à la longueur du col de l'épi ont été identifiés dans les deux sites, suggérant leur stabilité. En revanche, les gènes candidats associés au PMG, au nombre d'épillets fertiles par épi et à la précocité d'épiaison semblent spécifiques à certaines conditions environnementales. Ces résultats obtenus aideraient les sélectionneurs en leur permettant de cibler directement les locus identifiés dans les programmes d'amélioration du blé.

Mots clés : diversité génétique, interaction génotype x environnement, stabilité, qualité, SNPs, GWAS, gènes candidats.