



République Algérienne Démocratique et Populaire



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ecole Nationale Supérieure Agronomique El-Harrach - Alger

المدرسة الوطنية العليا للفلاحة - الحراش - الجزائر

Thèse

En vue de l'obtention du diplôme de Doctorat LMD en Sciences Agronomiques

Département : Productions Végétales

Spécialité : Amélioration des Productions Végétales et Agriculture Durable

Etude de la résilience des sélections de pois protéagineux en culture pure et en association sous déficit hydrique

Présenté par : M. TIFEST Chems eddine

Soutenu le : 27/04/2026

Devant le jury

Président : Mme BOURAS Fatma Zohra

MCA (ENSA, El-Harrach, Alger)

Directeur de thèse : Mme LAOUAR Meriem

Professeur (ENSA, El-Harrach, Alger)

Examineurs :

Mme BELABBAS Meryem

MCA (Univ. Djilali Liabes, SBA, Alger)

M. HADDAD Benalia

MCA (ENSA, El-Harrach, Alger)

Année universitaire : 2025/2026

Table des matières

Résumé

Abstract

الملخص

Listes des figures	I
Listes des tableaux.....	IV
Listes des abréviations	VI
Introduction Générale	1
Chapitre 1 : Synthèse bibliographique	5
I. Pois protéagineux (<i>Pisum sativum</i> L.)	5
I.1. Taxonomie	5
I.2. Origine et domestication.....	7
I.3. Caractères généraux.....	8
I.4. Utilisation	9
I.5. Enjeux de la culture du pois protéagineux	10
I.6. État des lieux et développements récents en Algérie et dans le monde.....	11
I.7. Facteur limitant la production.....	12
I.7.1. Facteurs abiotiques	12
I.7.2. Facteurs biotiques	13
I.8. Cycle de développement.....	18
I.9. Conduite et entretien de la culture	20
I.10. Diversité génétique	21
I.11. Sélection et amélioration génétique	23
I.11.1. Sélection phénotypique (PS).....	24
I.11.2. Sélection génotypique	24
I.11.3. Sélection évolutive (ES)	26
I.12. Importance des variétés locales et nécessité de leur conservation	27
I.12.1. Erosion génétique	27
I.12.2. Conservation des variétés locales	28
II. Associations des cultures fourragères	29
II.1. Généralités.....	29
II.2. Définition des associations de culture.....	29
II.3. Types des associations de culture	29
II.3.1. Associations en mélange	30
II.3.2. Associations en bandes	30

Table des matières

II.3.3. Associations en rangs	31
II.3.4. Associations en relais	32
II.4. Interactions des espèces au sein des associations de cultures	32
II.4.1. Interactions actives	32
II.4.2. Interactions passives	32
II.4.3. Approche 4C.....	33
II.5. Indices utilisés pour évaluer les associations de culture.....	35
II.5.1. Land Equivalent Ratio.....	35
II.5.2. Area Time Equivalent Ratio.....	35
II.5.3. Weed Control Efficiency.....	35
II.5.4. Compétitive ratio.....	36
II.5.5. Actual yield loss	36
II.5.6. Intercropping Advantage	37
II.5.7. Harvest index.....	37
II.6. Avantages de l'association céréales-légumineuses	37
II.7. Inconvénients de l'association céréales-légumineuses.....	39
II.8. Adaptation phénotypique : critères pour le choix des variétés en association	39
II.9. Principaux travaux réalisés sur l'effet de la variété dans l'association (céréale- légume)	40
II.9.1. Association orge-pois	40
II.9.2. Association blé dur- féverole	41
II.9.3. Association maïs - haricot	41
II.9.4. Association maïs-niébé.....	42
II.9.5. Association blé dur- pois chiche.....	42
Chapitre II : Etude de la Résilience de génotypes de pois protéagineux issus de différentes méthodes de sélection en conditions subhumides algérienne	43
Résumé.....	43
Introduction.....	44
I. Matériel et méthodes	45
I.1. Matériel génétique	45
I.2. Sites expérimentaux.....	47
I.3. Conduite de la culture et dispositif expérimental.....	49
I.4. Paramètres mesurés.....	51
I.5. Analyse statistique	51
II. Résultats.....	53
III. Discussion	59
Conclusion	62
Chapitre III : Sélection multi-approche du pois protéagineux (<i>Pisum sativum</i> L.) en monoculture et en association avec l'orge pour une agriculture méditerranéenne durable.	64
Résumé.....	64

Table des matières

Introduction.....	65
I. Matériel et méthodes	67
I.1. Matériel génétique.....	67
I.2. Site expérimental	67
I.3. Conduite de la culture et dispositif expérimental.....	68
I.4. Paramètres mesurés.....	68
I.4.1. Rendement total par système de culture.....	68
I.4.2. Rendement en grains et en paille du pois en monoculture	69
I.4.3. Rendement en grains et en paille du pois en association.....	69
I.4.4. Rendement en grains et en paille de l'orge en association.....	69
I.5. Analyses statistiques.....	70
II. Résultats	71
II.1. Rendement total par système de culture	71
II.2. Rendement en grain/paille de pois protéagineux mené en monoculture.....	72
II.3. Rendement en grain et en paille de pois protéagineux mené en association	74
II.4. Influence des génotypes de pois protéagineux sur l'orge.....	75
III. Discussion	77
III.1. Effet relatif du système de culture et du génotype sur le rendement total	77
III.2. Rendement en grain et en paille du pois en monoculture : importance de l'environnement	78
III.3. Expression génotypique du rendement du pois en association avec l'orge	79
II.4. Influence des génotypes de pois sur la performance de l'orge associée	80
II.5. Implications pour la sélection variétale.....	80
Conclusion	81
Chapitre IV : Résilience de génotypes de pois protéagineux issus de différentes méthodes de sélection en condition subhumide et semi-aride en Algérie.....	82
Résumé.....	82
Introduction.....	83
I. Matériel et méthodes	84
I.1. Matériel génétique	84
I.2. Site expérimental	84
I.3. Conduite de la culture et dispositif expérimental.....	88
I.4. Paramètres mesurés.....	90
I.5. Analyse statistique	91
II. Résultats.....	92
II.1. Rendement en grain	92
II.1.1. Comparaison entre les 14 génotypes de pois protéagineux dans la région semi-aride....	92

Table des matières

II.1.2. Comparaison entre les 14 géotypes de pois protéagineux dans deux étages bioclimatiques (sub-humide et semi-aride).	92
II.1.3. Comparaison entre les 14 géotypes de pois protéagineux dans 5 environnements sub-humide et semis aride.....	93
II.2. Rendement en Paille	94
II.2.1. Comparaison entre les 14 géotypes de pois protéagineux dans la région semi-aride....	94
II.2.2. Comparaison entre les 14 géotypes de pois protéagineux dans les deux étages bioclimatiques (subhumide et semi-aride).	95
II.2.2.1. Classement des environnements	96
II.2.2.2. Discriminativité vs. Représentativité	96
II.2.2.3. Classement des géotypes : Evaluation du meilleur géotype	97
II.2.2.4. Moyenne/ stabilité :	98
II.2.2.5. Qui-a-gagné-où.....	99
II.2.3. Comparaison entre les 14 géotypes de pois protéagineux dans 5 environnements sub-humide et semis aride.....	101
II.2.3.1. Classement des environnements	102
II.2.3.2. Discriminativité vs. Représentativité	103
II.2.3.3. Classement des géotypes : Evaluation du meilleur géotype	103
II.2.3.4. Moyenne/stabilité :	104
II.2.3.5. Qui gagné-où	105
III. Discussion	107
III.1. Rendement en grain : prédominance de l'effet environnement	107
III.2. Rendement en paille : un caractère discriminant pour la sélection	108
III.3. Interaction géotype × environnement inter-régions pour le rendement en paille	108
III.4. Interaction géotype × environnement interannuelle pour le rendement en paille	109
Conclusion	109
Conclusion générale	111
Références bibliographiques	114

Résumé

Le pois protéagineux (*Pisum sativum* L.) est une culture stratégique pour les systèmes agricoles méditerranéens en raison de sa richesse en protéines, de sa capacité de fixation symbiotique de l'azote et de son rôle structurant dans la durabilité des rotations céréalières. Dans un contexte de changement climatique marqué par une forte variabilité pluviométrique et des contraintes croissantes sur les sols et l'eau, l'amélioration conjointe de la productivité, de la stabilité et de la résilience de cette culture constitue un levier essentiel pour la durabilité des systèmes pluviaux. Cette thèse visait à analyser la performance agronomique, la stabilité et l'adaptation de génotypes de pois protéagineux issus de différentes approches de sélection (génomique, phénotypique et évolutive) à travers des environnements contrastés, du subhumide au semi-aride en Algérie. Entre 2021 et 2024, trois dispositifs expérimentaux complémentaires ont été mis en œuvre sur un ensemble de 37 génotypes, combinant évaluations en monoculture, en association avec l'orge et sous conditions de stress hydrique plus marqué. L'évaluation pluriannuelle en monoculture a montré une forte influence de l'environnement, qui expliquait plus de 50 % de la variation du rendement en grain, confirmant la sensibilité du pois aux conditions climatiques annuelles. Dans ce contexte, les génotypes issus de la sélection génomique se sont distingués par des performances supérieures et une stabilité accrue. Les lignées AI_S118 et AI_L155, ainsi que evpop_AL, KI_S8 et KI_41, ont présenté les meilleures combinaisons rendement-stabilité, dépassant les témoins de référence et montrant un fort potentiel d'adaptation aux environnements subhumides. Ces résultats ont été consolidés par l'étude des associations pois-orge, qui a permis d'évaluer la plasticité des génotypes dans des systèmes de culture plus complexes. Les analyses AMMI et ACP ont mis en évidence des différences nettes entre génotypes et systèmes, tant pour le rendement en grain que pour la production de paille. Le génotype KI_S8 s'est distingué par sa polyvalence et montre une bonne capacité d'adaptation dans les deux systèmes. evpop_AL a performé en monoculture, tandis que KI_S78 a offert une bonne productivité en association. Certains génotypes (KA_S106 et AI_L15,) ont favorisé des rendements élevés en paille d'orge, soulignant la complémentarité fonctionnelle entre espèces et l'intérêt agronomique des associations culturales. Enfin, l'extension des essais aux environnements semi-arides a permis de tester la robustesse des génotypes sous contrainte hydrique. Les analyses AMMI et GGE ont identifié plusieurs génotypes stables et performants pour la production de paille, notamment AI_S118, AI_S6, KI_S125 et KA_L250. La prédominance de génotypes issus de la sélection génomique parmi les mieux classés confirme la supériorité globale de cette approche, déjà observée en monoculture et en association. Certains génotypes, tels que evpop_AL, KA_S106 et KA_156, ont montré une stabilité remarquable à travers les environnements subhumide et semi-aride, illustrant leur large adaptation. En considérant l'ensemble des cinq environnements, evpop_AL, AI_S6 et AI_S118 se sont distingués par leur performance élevée et leur stabilité, traduisant une large adaptation interannuelle et interrégionale. Dans l'ensemble, cette étude démontre que la combinaison d'approches de sélection et l'évaluation intégrée des génotypes à travers différents systèmes de culture et gradients environnementaux constituent une stratégie efficace pour identifier des variétés de pois protéagineux productives, stables et résilientes. L'utilisation conjointe des analyses multi-environnements (AMMI, GGE) a permis de mieux comprendre les interactions génotype × environnement et d'orienter les programmes d'amélioration variétale vers des idéotypes adaptés à la variabilité climatique croissante des systèmes méditerranéens.

Mots clés : Pois protéagineux ; Changement climatique ; Sélection génomique ; Sélection phénotypique, Sélection évolutive ; Systèmes pluviaux ; Association culturale ; Model AMMI ; Model GGE ; Résilience ; Stabilité ; Interactions génotype × environnement.

Abstract

Protein pea (*Pisum sativum* L.) is a strategic crop for Mediterranean agricultural systems due to its high protein content, its ability to fix atmospheric nitrogen through symbiosis, and its key role in enhancing the sustainability of cereal-based crop rotations. In the context of climate change, characterized by increasing rainfall variability and growing constraints on soil and water resources, the simultaneous improvement of productivity, stability, and resilience of this crop represents a major lever for the sustainability of rainfed systems. This thesis aimed to analyze the agronomic performance, stability, and adaptability of protein pea genotypes derived from different breeding approaches (genomic, phenotypic, and evolutionary) across contrasting environments ranging from sub-humid to semi-arid conditions in Algeria. Between 2021 and 2024, three complementary experimental designs were implemented on a set of 37 genotypes, combining evaluations under sole cropping, intercropping with barley, and more severe water stress conditions. The multi-year evaluation under sole cropping revealed a strong environmental effect, which accounted for more than 50% of the variation in grain yield, confirming the high sensitivity of pea to annual climatic conditions. In this context, genotypes derived from genomic selection consistently exhibited superior performance and enhanced yield stability. The lines AI_S118 and AI_L155, as well as evpop_AL, KI_S8, and KI_41, showed the best yield–stability combinations, outperforming reference cultivars and demonstrating a high adaptive potential under sub-humid environments. These findings were further supported by the analysis of pea–barley intercropping systems, which enabled the assessment of genotype plasticity within more complex cropping systems. AMMI and PCA analyses highlighted clear differences among genotypes and cropping systems for both grain yield and straw production.

The genotype KI_S8 stood out for its versatility and showed good adaptability in both systems. evpop_AL performed well in monoculture, whereas KI_S78 exhibited good productivity in intercropping. Some genotypes (KA_S106 and AI_L15) promoted high barley straw yields, highlighting functional complementarity between species and the agronomic value of intercropping systems. Finally, extending the trials to semi-arid environments allowed the robustness of genotypes under water-limited conditions to be assessed. AMMI and GGE biplot analyses identified several stable and high-performing genotypes for straw production, notably AI_S118, AI_S6, KI_S125, and KA_L250. The predominance of genotypes derived from genomic selection among the top-ranked entries confirms the overall superiority of this approach, as already observed under sole cropping and intercropping conditions. Some genotypes, such as evpop_AL, KA_S106, and KA_156, exhibited remarkable stability across both sub-humid and semi-arid environments, illustrating their broad adaptation. Considering all five environments, evpop_AL, AI_S6, and AI_S118 stood out for their high performance and stability, reflecting broad interannual and interregional adaptation. Overall, this study demonstrates that combining breeding approaches with integrated multi-environment evaluation across different cropping systems and environmental gradients is an effective strategy for identifying protein pea varieties that are productive, stable, and resilient. The joint use of multi-environment analyses (AMMI and GGE) improved the understanding of genotype $\times$ environment interactions and supports the orientation of breeding programs toward ideotypes adapted to the increasing climatic variability of Mediterranean agricultural systems.

Keywords: Pea protein; Climate change; Genomic selection; Phenotypic selection; Evolutionary selection; Rainfed system; Intercropping; AMMI model; GGE model; Resilience; Stability; Genotype by Environment Interaction (GEI)

يُعدّ البازلاء البروتينية (*Pisum sativum* L.) محصولاً استراتيجياً في الأنظمة الزراعية المتوسطة نظراً لغناه بالبروتينات، وقدرته على تثبيت الأزوت

الجوي تكافلياً، ودوره المهم في تعزيز استدامة الدورات الزراعية المعتمدة على الحبوب. وفي ظل التغيرات المناخية المتسارعة، المتمثلة في التذبذب الكبير في التساقطات المطرية وتزايد الضغوط على الموارد المائية والتربة، أصبح تحسين الإنتاجية والاستقرار والقدرة على التكيف لهذا المحصول ضرورة أساسية لضمان استدامة الأنظمة الزراعية البعلية. هدفت هذه الأطروحة إلى تحليل الأداء الزراعي، والاستقرار، والقدرة على التكيف لمجموعة من الأنماط الوراثية للبازلاء البروتينية، الناتجة عن عمليات اختيار جينومية وظاهرية وتطورية، وذلك عبر بيانات متباعدة تمتد من المناخ شبه الرطب إلى شبه الجاف في الجزائر. وخلال الفترة الممتدة من 2021 إلى 2024، تم تنفيذ ثلاثة تصاميم تجريبية متكاملة شملت 37 نمطاً وراثياً، جمعت بين التقييم في الزراعة الأحادية، والزراعة البينية مع الشعير، وظروف إجهاد مائي أكثر حدة. أظهرت التقييمات متعددة السنوات في الزراعة الأحادية تأثيراً قوياً للبيئة، حيث فسّرت أكثر من 50% من التباين في مردود الحبوب، مما يؤكد الحساسية العالية لمحصول البازلاء للظروف المناخية السنوية. وفي هذا السياق، تميّزت الأنماط الوراثية الناتجة عن الانتقاء الجينومي بأداء متفوّق واستقرار أعلى في المردود. وقد أظهر النمطين AI_S118 و AI_L155، إلى جانب evpop_AL و KI_S8 و KI_41، أفضل توازن بين المردود والاستقرار، متجاوزين الأصناف الشاهدة، ومبيّنة قدرة عالية على التكيف في البيئات شبه الرطبة. وقد عززت هذه النتائج من خلال دراسة نظم الزراعة البينية بازلاء-شعير، التي سمحت بتقييم المرونة الظاهرية للأنماط الوراثية ضمن أنظمة زراعية أكثر تعقيداً. وأبرزت تحليلات AMMI و ACP وجود فروق واضحة بين الأنماط الوراثية وأنظمة الزراعة، سواء من حيث مردود الحبوب أو إنتاج القش. تميّز النمط الوراثي KI_S8 بتعددته وأظهر قدرة جيدة على التكيف في كلا النظامين. وقد حقق evpop_AL أداءً جيداً في الزراعة الأحادية، في حين أظهر KI_S78 إنتاجية جيدة في الزراعة البينية. كما ساهمت بعض الأنماط الوراثية (KA_S106 و AI_L15) في تحقيق مردود مرتفع من قش الشعير، مما يبرز التكامل الوظيفي بين الأنواع والأهمية الزراعية للزراعات البينية. وأخيراً، سمح توسيع التجارب إلى البيئات شبه الجافة باختبار متانة الأنماط الوراثية تحت ظروف الإجهاد المائي. وقد مكّنت تحليلات AMMI و GGE من تحديد عدة أنماط وراثية مستقرة وعالية الأداء في إنتاج القش، من بينها AI_S118 و AI_S6 و KI_S125 و KA_L250. ويؤكد الحضور البارز للأنماط الوراثية الناتجة عن الانتقاء الجينومي ضمن أفضل نتائج التفوق العام لهذه المقاربة، وهو ما لوحظ سابقاً في الزراعة الأحادية والزراعة البينية. كما أظهرت بعض الأنماط الوراثية، مثل evpop_AL و KA_S106 و KA_156، استقراراً ملحوظاً عبر البيئات شبه الرطبة وشبه الجافة، مما يعكس قدرتها على التكيف الواسع. بأخذ جميع البيانات الخمس بعين الاعتبار، تميّزت الأنماط الوراثية evpop_AL و AI_S6 و AI_S118 بأداء واستقرار مرتفع، مما يعكس قدرتهم الواسعة على التكيف بين السنوات وبين المناطق. بوجه عام، تبين هذه الدراسة أن الجمع بين مقاربات الانتقاء المختلفة، والتقييم المتكامل للأنماط الوراثية عبر نظم زراعية متعددة وتدرجات بيئية متنوعة، يُعدّ استراتيجية فعالة لتحديد أصناف من البازلاء البروتينية تتميز بالإنتاجية والاستقرار والمرونة. كما أسهم الاستخدام المشترك لتحليلات البيانات المتعددة AMMI و GGE في تعميق فهم تفاعلات النمط الوراثي × البيئة، وتوجيه برامج التحسين الوراثي نحو أنماط مثالية قادرة على التكيف مع التزايد المستمر في التقلبات المناخية ضمن الأنظمة الزراعية المتوسطة.

الكلمات المفتاحية: البازلاء البروتينية; التغير المناخي; الانتقاء الجيني; الانتقاء الظاهري; الانتقاء التطوري; النظام البعلية; الزراعة المختلطة; نموذج AMMI; نموذج GGE; الصمود; الاستقرار; التفاعل بين النمط الجيني والبيئة.