

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة احمد بن يحيى الوئرشيسي تيسمسيلت
Université Ahmed Ben Yahya El Wencharissi Tissemsilt



Thèse

En vue de l'obtention du Doctorat L-M-D en Filière :
Sciences biologiques

Spécialité : **Biologie végétale**

Présentée par : Mme *CHAHIH Hadjira*

Thème

***Caractérisation des interactions légumineuses-rhizobia
dans les systèmes céréales
vis-à-vis aux contraintes abiotiques***

Soutenue le, 30/01/2025

Thèse soutenue publiquement devant le jury

Mr. BEKADA A. M. A.	Professeur, Univ. Tissemsilt	président
Mr. LAZALI M.	Professeur, Univ. Khmis Miliana	Directeur de thèse
Mr. BOUNACEUR F.	Professeur, Univ. Tissemsilt	Examineur
Mr. MOKABLI A.	Professeur, Univ. Khmis Miliana	Examineur
Mr. TEFIEL H.	MCA, Univ. Tissemsilt	Examineur
Mr. BOUSALHIH B.	MCA, Univ. Khmis Miliana	Examineur

Année universitaire : 2024-2025

Remerciements

Tout d'abord je remercie notre créateur pour ses innombrables bienfaits dont je ne peux que souligner l'immensité.

*Je pense particulièrement au professeur **Mohamed LAZALI**, mon directeur de thèse, pour la finesse de ses attitudes sur le plan aussi bien humain que scientifique. Ses remarques successives et professionnelles ont permis d'améliorer les différentes versions de ce travail. Il a toujours trouvé comme encadrant le juste équilibre entre la liberté qu'il m'a laissée dans le choix des grandes orientations et la détermination des pistes à suivre, d'une part, et un soutien total et sans faille dans les moments délicats, d'autre part. De lui, j'ai toujours reçu non seulement les encouragements que le doctorant ait tant besoin, mais aussi les précieux conseils pratiques que seul un homme, ayant des qualités humaines comme lui, peut amener à prodiguer. Grâce à son approche respectueuse de la personne humaine, je me suis continuellement senti à l'aise. Je lui en suis infiniment gré.*

*J'éprouve une déférence particulière à l'égard de **Mr TEFIEL Hakim** (Directeur du laboratoire LEA), **Mr. BEKADA Ahmed Mohamed Ali** (CFD), pour leur générosité, leur disponibilité et leur soutien pour bien mener en partie notre étude. Je leur prie de trouver ici l'expression de ma reconnaissance et mon pur dévouement.*

*Je voudrai ensuite remercier les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer mon travail de thèse. Merci à **Mr. BEKADA A. M. A.**, d'avoir accepté de présider le jury. Ainsi que **Mr. BOUNACEUR F.**, **Mr. TEFIEL H.**, **Mr. MOKABLI A.** et **Mr. BOUSALHIH B.** d'avoir accepté d'être les examinateurs de ma thèse.*

A mes chers collègues enseignants et personnels de l'université de Tissemsilt pour leurs très précieux encouragements.

Doit également être remerciée, toute personne ayant participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicace

A la mémoire de ma mère

A mon père

A mon mari

A la lumière de ma vie, mes deux anges Razane et Nourane

A ma petite sœur adorée Wissal

A mes frères et sœurs chaqu'un par son nom

Liste des Publications

Article paru dans une revue à comité de lecture

CHAHIH, H., DREVON, J. J., & LAZALI, M. (2024). Intercropping Chickpea with Durum Wheat Enhances Nutrient Uptake and Grain Yield Under Low Phosphorus Availability. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 55(12), 1733-1746.
<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00103624.2024.2328618>

Caractérisation des interactions légumineuses-rhizobia dans les systèmes céréales vis-à-vis aux contraintes abiotiques

Résumé

La faible disponibilité en phosphore (P) dans les sols est un facteur limitant majeur pour la production des légumineuses fixatrices de N₂, notamment dans les régions méditerranéennes. Cette carence en phosphore affecte particulièrement les légumineuses, comme le pois chiche, qui dépendent de la symbiose rhizobienne pour la fixation de l'azote atmosphérique. Des études de terrain ont été menées pour évaluer les réponses de cette symbiose à la déficience en phosphore, en examinant comment les systèmes d'association culturale légumineuses-céréales peuvent améliorer les bénéfices de cette symbiose, surtout sous des contraintes abiotiques telles que la déficience en phosphore, prenant en compte leur taux de croissance, leur rendement en graines et l'efficacité de leur symbiose rhizobienne. Pour répondre à cet objectif, les génotypes de pois chiche sont cultivés avec un dispositif en bloc aléatoire complet en 2017 dans la région de Boumedfaa (Algérie), les résultats montrent des rendements variant entre 20 et 40 q/ha. Les génotypes FLIP 85-88C. et FLIP 90-13C. ont obtenu les meilleurs rendements. De plus, le génotype FLIP 93-93C. a démontré une meilleure EUSR (2,82 gSDWg⁻¹ NDW) par rapport à FLIP 97-677C. (0,1 gSDWg⁻¹ NDW). Les génotypes optimisés pour l'utilisation du P ont affiché des rendements supérieurs et sont mieux adaptés aux conditions de faible disponibilité en P.

L'introduction de systèmes d'association culturale entre légumineuses et céréales permet de maximiser les avantages de la symbiose rhizobienne, en particulier lorsque les conditions abiotiques, comme une faible disponibilité en P, limitent la croissance des cultures. Une deuxième étude a été réalisée pour évaluer l'adaptation des génotypes de pois chiche à la déficience en phosphore dans ces systèmes céréaliers. Pour répondre à cette étude, une analyse a été faite sur la croissance, la nodulation et l'acquisition de P des sept génotypes de pois chiche cultivées en monoculture et en association avec le blé dur (*Triticum durum* Desf), sous des conditions de limitation en P. Les résultats ont montré que la fixation symbiotique de N₂ (FSN) est un processus très sensible à la carence en phosphore, étant fortement influencée par la nodulation des racines.

Les essais de terrain ont révélé que les génotypes de pois chiche testés présentent des niveaux variés de tolérance aux conditions édapho-climatiques, en particulier à la faible disponibilité en phosphore dans le sol. Ces différences entre les génotypes sont attribuées à des variations dans l'efficacité d'utilisation du phosphore (EUP), ce qui ouvre la voie à une sélection génétique orientée vers une meilleure gestion des intrants en agriculture. Les génotypes les plus efficaces en termes d'utilisation du phosphore ne se distinguent pas seulement par leur biomasse élevée, mais également par leur capacité supérieure à utiliser la symbiose rhizobienne de manière plus efficace. Le génotype FLIP 93-93C. a montré une meilleure efficacité d'utilisation du phosphore en association avec le blé dur (21,32 g TDW.mg P uptake⁻¹) en comparant avec la monoculture (15,26 g TDW.mg P uptake⁻¹). Vis-à-vis EUSR, FLIP 93-93C. a montré une meilleure utilisation de la symbiose rhizobienne dans deux sites différents (2,11 g SDWg⁻¹ NDW sous suffisance en P) par rapport (0,82 g SDWg⁻¹ NDW sous déficience en P).

Les interactions entre le pois chiche et le blé dur sont traduits par une augmentation de la croissance en biomasse totale mixte exprimé par un LER élevé tel que les génotypes FLIP 97-677C., FLIP 93-93C. et FLIP 85-88C. ont montré un LER supérieur à 1 en association avec le blé dur. En outre, les meilleurs rendements chez le pois chiche ont été observé chez FLIP 97-677C. et FLIP 93-93C. en association avec un LER supérieure par rapport aux autres génotypes qui montrent un rendement meilleur en monoculture. Parallèlement, la meilleure accumulation du P par le blé est notée dans le cas d'associations comparativement au système de monoculture.

Comprendre les mécanismes d'adaptation à la carence en phosphore est crucial pour améliorer la productivité des légumineuses et identifier les symbioses les plus efficaces. Cela permettra de développer des variétés de pois chiche plus résistantes et plus performantes dans des environnements pauvres en phosphore, contribuant ainsi à une agriculture plus durable et résiliente. Les recherches futures devraient se concentrer sur l'identification des traits génétiques et physiologiques qui confèrent une tolérance accrue à la déficience en P, ainsi que sur l'amélioration des pratiques agricoles pour optimiser l'utilisation du P dans les systèmes de culture mixte légumineuse-céréale.

Mots clés : Association céréale-légumineuse, pois chiche, blé dur, nodulation, déficience en phosphore, fixation de N₂, rhizosphère.

Characterization of Legume-Rhizobia Interactions in Cereal Systems in Relation to Abiotic Constraints

Abstract

Low phosphorus (P) availability in soils is a major limiting factor for the production of nitrogen-fixing legumes, particularly in Mediterranean regions. This phosphorus deficiency especially affects legumes, such as chickpea, which rely on rhizobial symbiosis for atmospheric nitrogen fixation. Field studies were conducted to assess the responses of this symbiosis to phosphorus deficiency by examining how legume-cereal intercropping systems can enhance the benefits of this symbiosis, particularly under abiotic constraints such as phosphorus deficiency, taking into account their growth rates, seed yields, and rhizobial symbiosis efficiency. To achieve this, chickpea genotypes were cultivated using a randomized complete block design in 2017 in the Boumedfaa region (Algeria), with yields ranging from 20 to 40 q/ha. The genotypes FLIP 85-88C and FLIP 90-13C achieved the best yields. Additionally, the FLIP 93-93C genotype demonstrated a better Symbiotic Nitrogen Use Efficiency (EURS) (2.82 g SDWg⁻¹ NDW) compared to FLIP 97-677C (0.1 g SDWg⁻¹ NDW). Genotypes optimized for P use displayed higher yields and were better adapted to low P availability conditions. The introduction of legume-cereal intercropping systems helps maximize the benefits of rhizobial symbiosis, particularly when abiotic conditions, such as low P availability, limit crop growth. A second study was conducted to evaluate the adaptation of chickpea genotypes to phosphorus deficiency in cereal systems. For this study, an analysis was conducted on the growth, nodulation, and P acquisition of seven chickpea genotypes cultivated in monoculture and intercropped with durum wheat (*Triticum durum* Desf), under P-limited conditions. The results showed that symbiotic nitrogen fixation (SNF) is a process highly sensitive to phosphorus deficiency, being strongly influenced by root nodulation. Field trials revealed that the tested chickpea genotypes exhibit varying levels of tolerance to edaphic-climatic conditions, particularly to low phosphorus availability in the soil. These differences between genotypes are attributed to variations in phosphorus use efficiency (PUE), paving the way for genetic selection aimed at better managing agricultural inputs. The most efficient genotypes in terms of phosphorus use not only exhibit higher biomass but also superior efficiency in utilizing rhizobial symbiosis. The FLIP 93-93C genotype showed better phosphorus use efficiency in intercropping with durum wheat (21.32 g TDW.mg P uptake⁻¹) compared to monoculture (15.26 g TDW.mg P uptake⁻¹). In terms of SNUE, FLIP 93-93C demonstrated better rhizobial symbiosis utilization at two different sites (2.11 g SDWg⁻¹ NDW under P sufficiency) compared to (0.82 g SDWg⁻¹ NDW under P deficiency). Interactions between chickpea and durum wheat resulted in increased total mixed biomass growth, as expressed by a high Land Equivalent Ratio (LER), with genotypes FLIP 97-677C, FLIP 93-93C, and FLIP 85-88C showing an LER greater than 1 in association with durum wheat. Moreover, the best chickpea yields were observed in FLIP 97-677C and FLIP 93-93C when intercropped, with a higher LER compared to other genotypes, which showed better yields in monoculture. Similarly, greater P accumulation by wheat was noted in intercropping systems compared to monoculture systems. Understanding the mechanisms of adaptation to phosphorus deficiency is crucial for improving legume productivity and identifying the most efficient symbioses. This will help develop more resilient and higher-performing chickpea varieties in phosphorus-poor environments, thus contributing to more sustainable and resilient agriculture. Future research should focus on identifying the genetic and physiological traits that confer increased tolerance to P deficiency, as well as improving agricultural practices to optimize P use in legume-cereal intercropping systems.

Keywords: Legume-cereal intercropping, chickpea, durum wheat, nodulation, phosphorus deficiency, N₂ fixation, rhizosphere.

توصيف تفاعلات البقوليات-الريزوبيا في نظم الحبوب بالنسبة لعراقيل غير الحبوبية

ملخص

يعد انخفاض توفر الفوسفور (P) في التربة عاملاً محددًا رئيسياً لإنتاج البقوليات المثبتة للنيتروجين، خاصة في المناطق المتوسطة. يؤثر هذا النقص في الفوسفور بشكل خاص على البقوليات مثل الحمص، التي تعتمد على التعايش الجذري لتثبيت النيتروجين الجوي.

أجريت دراسات ميدانية لتقييم استجابة هذا التعايش لنقص الفوسفور، من خلال فحص كيف يمكن لأنظمة الزراعة البينية للبقوليات والحبوب تحسين فوائد هذا التعايش، خاصة في ظل القيود اللاأحيائية مثل نقص الفوسفور، مع مراعاة معدلات النمو، وإنتاجية البذور، وكفاءة التعايش الجذري. لتحقيق هذا الهدف، زُرعت الأنواع الوراثية من الحمص باستخدام تصميم عشوائي كامل في عام 2017 في منطقة بومدفع (الجزائر)، حيث أظهرت النتائج إنتاجية تتراوح بين 20 و 40 قنطار/هكتار. حققت الأنواع الوراثية FLIP 85-88C و FLIP 90-13C أفضل إنتاجية. بالإضافة إلى ذلك، أظهر النوع الوراثي FLIP 93-93C كفاءة أفضل في استخدام التعايش الجذري (2.82) غرام وزن جاف للساق لكل غرام وزن جاف للعقد الجذرية) مقارنةً بالنوع FLIP 97-677C (0.1) غرام وزن جاف للساق لكل غرام وزن جاف للعقد الجذرية). أظهرت الأنواع الوراثية المُحسنة لاستخدام الفوسفور إنتاجية أعلى وكانت أفضل تكيفاً مع ظروف نقص الفوسفور. يساهم إدخال أنظمة الزراعة البينية بين البقوليات والحبوب في تعزيز فوائد التعايش الجذري، خاصةً عندما تحد الظروف اللاأحيائية مثل نقص الفوسفور من نمو المحاصيل. أُجريت دراسة ثانية لتقييم تكيف الأنواع الوراثية للحمص مع نقص الفوسفور في هذه الأنظمة الزراعية. وللإجابة عن هذه الدراسة، تم إجراء تحليل للنمو والعقد الجذرية وامتصاص الفوسفور لسبعة أنواع وراثية من الحمص المزروعة في الزراعة الأحادية وفي الزراعة البينية مع القمح الصلب (*Triticum durum Desf*)، تحت ظروف نقص الفوسفور.

أظهرت النتائج أن تثبيت النيتروجين التعايشي (SNF) هو عملية حساسة جدًا لنقص الفوسفور، ويتأثر بشكل كبير بتكوين العقد الجذرية. كشفت التجارب الميدانية أن الأنواع الوراثية للحمص المُختبرة تُظهر مستويات متفاوتة من التكيف مع الظروف المناخية الترابية، لا سيما نقص الفوسفور في التربة. تُعزى هذه الفروق بين الأنواع الوراثية إلى اختلافات في كفاءة استخدام الفوسفور (PUE)، مما يمهد الطريق لاختيار وراثي يهدف إلى تحسين إدارة المدخلات الزراعية. أظهرت الأنواع الوراثية الأكثر كفاءة في استخدام الفوسفور ليس فقط إنتاجية أعلى في الكتلة الحيوية ولكن أيضاً قدرة أعلى على الاستفادة بشكل أكثر كفاءة من التعايش الجذري. أظهر النوع الوراثي FLIP 93-93C كفاءة أفضل في استخدام الفوسفور عند الزراعة البينية مع القمح الصلب (21.32) غرام وزن جاف لكل ملغ امتصاص (P مقارنةً بالزراعة الأحادية 15.26) غرام وزن جاف لكل ملغ امتصاص. (P فيما يتعلق بكفاءة استخدام التعايش الجذري) (SNUE)، أظهر النوع FLIP 93-93C استخداماً أفضل للتعايش الجذري في موقعين مختلفين (2.11) غرام وزن جاف للساق لكل غرام وزن جاف للعقد الجذرية في حالة وفرة (P مقارنةً 0.82) غرام وزن جاف للساق لكل غرام وزن جاف للعقد الجذرية في حالة نقص (P أدت التفاعلات بين الحمص والقمح الصلب إلى زيادة نمو الكتلة الحيوية المختلطة، كما هو معبر عنه بنسب معادلة الأرض (LER) العالية، حيث أظهرت الأنواع FLIP 97-677C و FLIP 93-93C و FLIP 85-88C نسب LER تزيد عن 1 في الزراعة البينية مع القمح الصلب. علاوةً على ذلك، لوحظت أفضل إنتاجية للحمص في الأنواع FLIP 97-677C و FLIP 93-93C عند الزراعة البينية مع نسب LER أعلى مقارنةً بالأنواع الأخرى التي أظهرت إنتاجية أفضل في الزراعة الأحادية. بالإضافة إلى ذلك، تم تسجيل أفضل تراكم للفوسفور في القمح في حالة الزراعة البينية مقارنةً بالزراعة الأحادية. إن فهم آليات التكيف مع نقص الفوسفور هو أمر حاسم لتحسين إنتاجية البقوليات وتحديد التعايشات الأكثر فعالية. سيساعد هذا في تطوير أصناف حمص أكثر مقاومة وفعالية في البيئات الفقيرة بالفوسفور، مما يساهم في الزراعة المستدامة والمرنة. ينبغي على الأبحاث المستقبلية التركيز على تحديد السمات الوراثية والفسولوجية التي تمنح تحملاً أكبر لنقص الفوسفور، بالإضافة إلى تحسين الممارسات الزراعية لتحقيق الاستخدام الأمثل للفوسفور في أنظمة الزراعة البينية بين البقوليات والحبوب.

الكلمات المفتاحية: الزراعة البينية للبقوليات والحبوب، الحمص، القمح الصلب، العقد الجذرية، نقص الفوسفور، تثبيت النيتروجين، الجذور.

Liste des abréviations

ANOVA : Analyse de variance

CIAT : Centre International d'Agriculture Tropicale

CNIS : Centre national de l'informatique et des statistiques

CR : Competitive ratio : le ratio de compétition

CV : Coefficient de variation

EUP : Efficience d'utilisation du phosphore

EUSR : efficience d'utilisation de la symbiose rhizobienne

FAO : Food and agriculture organisation

FSN : Fixation symbiotique de l'azote

G : Gramme

Ha : hectare

ITGC : Institut technique des grandes cultures

J.A.S : Jours après le semis

LER : Land Equivalent Ratio : le ratio équivalent des surfaces

MADR : Ministère d'agriculture et de développement rural

MO : Matière organique

MS ; Matière sèche

N : azote

P : phosphore

Q : quintal

Rpm : Tours par minute

RDW : Root Dry Wheat : biomasse racinaire sèche

NDW : Nodule Dry Wheat ; Biomasse nodulaire sèche

SDW : Shoot dry wheat : biomasse aérienne sèche

T : température

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Récapitulatif des productions (t), des superficies (ha) moyennes mondiales et maghrébines de pois chiche entre 2012 et 2022	06
Tableau I.2 : Récapitulatif des productions (t), des superficies (ha) moyennes mondiales et maghrébines de blé dur entre 2012 et 2022	07
Tableau I.3 : Liste des principales variétés de pois chiche cultivées en Algérie	11
Tableau I.4 : Types de Rhizobias nodulant des légumineuses	13
Tableau I.5 : Liste quelques variétés de blé dur cultivées en Algérie	19
Tableau II. 1 : liste de génotypes de pois chiche utilisé à l'essai d'Ain Defla	43
Tableau II. 2 : description expérimentale de l'essai de boumedfaa (Ain Defla)	44
Tableau II. 3 : Caractéristiques physico-chimiques du sol –essai boumedfaa-	49
Tableau II. 4. Hauteur, nombre des fleurs et ramification primaire des plants des génotypes de pois chiche.	50
Tableau II.5 : Concentration de l'azote dans la partie aérienne et nodulaire chez les génotypes de pois chiche sous déficience en P.	57
Tableau III.1: concentration du phosphore dans la partie aérienne et racinaire et P absorbé par le blé dur et le pois chiche cultivés en association et en monoculture.....	73
Tableau III.2 : Efficacité d'utilisation et d'absorption du phosphore (EUP/EAP) pour le pois chiche et le blé dur cultivés en monoculture et en association pendant deux saisons de croissance en 2018 et 2019.	75
Tableau III.3 : Rapport d'équivalence en terre (LER) et rapport de compétitivité (CR) pour le rendement, la biomasse sèche totale et le phosphore absorbé au cours des deux saisons de croissance 2018 et 2019.	76
Tableau IV.1 : les propriétés physico-chimiques des sols des deux sites expérimentaux choisis.....	83
Tableau IV.2 : Rapport d'équivalence en terre (LER) pour le rendement, la biomasse sèche totale des génotypes de pois chiche cultivés dans S1 et S2 au cours des deux saisons de croissance 2018 et 2019.	96

Liste des figures

Figure I.1: différentes étapes de l'établissement de la symbiose rhizobia – légumineuse.....	14
Figure I.2 : Etapes précoces du développement d'un nodule racinaire.....	15
Figure I.3 : Semis associé de blé dur (2 rangs sur 3) et de féverole (1 rang sur 3).....	22
Figure I.4 : le cycle du phosphore dans le sol.....	30
Figure I.5 : Les formes du Phosphore et leurs interactions.....	31
Figure I.6 : Déplacement par diffusion du phosphore vers la plante	34
Figure I.7 : Plan de la thèse.	39
Figure II. 1 : localisation de l'essai dans l'agro écosystème d'AIN Defla (Algérie).....	42
Figure II. 2 : localisation géographique de l'essai (Google Maps, 2024).....	43
Figure II. 3 : essai de géotypes de pois chiche dans la région Boumedfaa -Ain defla- (2017).....	44
Figure II. 4 : la croissance des géotypes de pois chiche.....	47
Figure II. 5 : récolte des plants de pois chiche au moment de la floraison	48
Figure II. 6. Biomasse des parties aériennes, racinaires et nodulaire des géotypes de pois chiche cultivés.	51
Figure II. 7. Nombre des nodules des géotypes de pois chiche cultivés.	52
Figure II.8. EUSR des géotypes de pois chiche cultivés sous déficience en P.	53
Figure II.9 Teneur de P dans la partie aérienne (A), nodulaire (B) des géotypes de pois chiche cultivés sous déficience en P.	54
Figure II.10 Corrélation de la biomasse nodulaire et la teneur en P des nodosités des géotypes de Pois chiche cultivés sous déficience en P.	55
Figure II.11 Efficience d'utilisation du phosphore des géotypes de pois chiche cultivés sous déficience en P.	56
Figure II.12. Evaluation du rendement en grains et ces composantes des géotypes de pois chiche cultivés sous déficience en P.	58
Figure III.1 : système d'association pois chiche-blé dur.....	66
Figure III. 2 : prélèvement des échantillons des plantes au moment de la floraison de pois chiche pour les différentes pesées	67
Figure III.3 : la biomasse nodulaire sèche du géotype de pois chiche cultivé en monoculture et en association durant deux saisons de croissance.	70

Figure III.4 : la biomasse aérienne et racinaire sèche de pois chiche et le blé dur cultivés en monocultures et en association durant deux saisons de croissance.	71
Figure III.5 : le rendement en grain ($q.ha^{-1}$) de pois chiche et le blé dur cultivés en monocultures et en association durant deux saisons de croissance.	72
Figure III.6 : Concentration d'Olsen-P dans la rhizosphère du pois chiche et du blé dur cultivés en monoculture et en association au cours des deux saisons de croissance 2018 et 2019.....	74
Figure IV.1 : les deux sites expérimentaux choisis.....	83
Figure IV. 1 : biomasse aérienne sèche (g/plant) des géotypes de pois chiche et blé dur cultivés en monoculture et en association sous suffisance (S1) et déficience (S2) en phosphore en 2018 (saison 1) et 2019 (saison 2).	88
Figure IV.2 : biomasse racinaire sèche (g/plant) des géotypes de pois chiche et blé dur cultivés en monoculture et en association sous suffisance (S1) et déficience (S2) en phosphore en 2018 (saison 1) et 2019 (saison 2)	90
Figure IV.3 : biomasse nodulaire sèche (g/plant) des géotypes de pois chiche cultivés en monoculture et en association sous suffisance (S1) et déficience (S2) en phosphore en 2018 (saison 1) et 2019 (saison 2).	91
Figure IV.4 : Rendement en grain ($q.ha^{-1}$) des géotypes de pois chiche et blé dur cultivés en monoculture et en association sous suffisance (S1) et déficience (S2) en phosphore en 2018 (saison 1) et 2019 (saison 2).	92
Figure IV.5 : Efficacité d'utilisation de la symbiose rhizobienne chez les géotypes de pois chiche sous deux types de cultures dans deux sites S1 et S2.	95

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre I: Synthèse bibliographique	
I. Aspect général sur la situation des grandes cultures en Algérie	4
II. Généralité sur le pois chiche et blé dur	6
1. La production et la répartition de la culture de pois chiche et blé dur	6
2. Le pois chiche	8
2.1. Classification botanique de la culture de pois chiche.....	8
2.2. Caractéristiques agro-morphologique de pois chiche et aire de dispersion.....	8
2.3. Aspect sur le matériel génétique de pois chiche sélectionné en Algérie	8
2.4. Importances de la culture de pois chiche	12
2.4.1. Intérêt d'activité rhizobienne	12
2.4.2. Symbiose légumineuse –rhizobia.....	13
2.4.3. Le processus de la nodulation	14
2.4.4. Le fonctionnement nodulaire et le déroulement de la FSN	16
2.4.5. La fixation nodulaire de N ₂ des légumineuses et les besoins en P	16
2.4.6. La fixation nodulaire de N ₂ des légumineuses et les besoins en O ₂	17
2.4.7. Les conditions influant l'activité symbiotique et la fixation de l'azote	17
3. Le blé dur	17
3.1. Classification botanique de la culture de blé dur	17
3.2. Caractéristique agro-morphologique de blé dur et aire de dispersion.....	17
3.3. Aspect sur le matériel génétique de blé dur	18
3.4. Importance de la culture de blé dur	19
III. Système d'association des cultures céréales légumineuses	19
1. Rôle et avantages de la culture associée en intercalaire	20
2. Type d'association des cultures	20
3. Partage des ressources entre les cultures associées	22
3.1. Facilitation	Error! Bookmark not defined.
3.2. Complémentarité	Error! Bookmark not defined.
3.3. Compétition	Error! Bookmark not defined.
3.3.1. Compétition pour la lumière	25
3.3.2. Compétition pour les éléments minéraux	25

3.3.3. Compétition pour l'eau.....	25
4. Processus d'acquisition des nutriments en association céréale-légumineuse	25
4.1. Diversité des traits racinaires et acquisition d'un nutriment entre espèces	26
4.2. Production des poils racinaires	26
IV. Le phosphore.....	27
1. La biodisponibilité du phosphore à l'interface sol-plante	27
1.1. Le phosphore dans le sol	27
1.1.1. Le phosphore minéral.....	28
1.1.2. Le phosphore organique	30
1.2. Le phosphore dans la plante.....	31
2. Le prélèvement du phosphore par la plante	31
3. La déficience en phosphore est une contrainte primaire à la productivité des plantes	32
4. Le prélèvement du phosphore par la plante et la nutrition phosphatée	32
5. Effet de la déficience en phosphore sur les légumineuses alimentaires	34
6. Effet de l'association des cultures légumineuses céréales sur la déficience en phosphore.....	34
Objectifs de recherche :.....	35
Problématique	35
Objectifs.....	35
Chapitre II	
Croissance, nodulation et rendement des génotypes de pois chiche (<i>Cicer arietinum L.</i>) dans les sols à faible disponibilité de P en Algérie, Cas de la wilaya d'Ain Defla	
1. Introduction.....	40
2. Matériel et méthodes	42
2.1. Localisation de l'essai et caractéristiques.....	42
2.2. Le matériel végétal utilisé.....	43
2.3. Analyses physico-chimique du sol.....	44
2.3.1. Analyse physique granulométrie %	45
2.3.2. Analyse chimique.....	45
2.4. Echantillonnage et paramètres mesurés.....	47
2.4.1. La biomasse aérienne, racinaire et nodulaire.....	47
2.4.2. Efficience d'utilisation de la symbiose rhizobienne (EUSR).....	47
2.4.3. Teneur de la partie aérienne et nodulaire en P	48

2.5.	Analyses statistiques et traitement des données.....	49
3.	Résultats.....	49
3.1.	Les analyses physico-chimiques du sol.....	49
3.2.	Performance générale de la croissance.....	49
3.3.	Croissance des plantes et nodulation.....	50
3.4.	La nodulation et l'EUSR	51
3.5.	Disponibilité du phosphore aérien et nodulaire	53
3.6.	Disponibilité d'azote aérien et nodulaire.....	56
3.7.	Le rendement en grains des génotypes de pois chiches	57
4.	Discussion.....	58
5.	Conclusion	61

Chapitre III

Le système association de culture pois chiche-blé dur améliore l'absorption des éléments nutritifs et le rendement en grains sous déficience en phosphore

1.	Introduction.....	63
2.	Matériels et méthodes.....	65
2.1.	Site expérimental et conditions climatiques	65
2.2.	Système de culture et dispositif expérimental des parcelles.....	65
2.3.	Prélèvement d'échantillons de plantes et de sol et mesures.....	66
2.4.	Le ratio d'équivalence de terre.....	68
2.5.	Le ratio de compétitivité.....	68
2.6.	Analyse statistique des données	69
3.	Résultats.....	70
3.1.	Croissance des plantes, nodulation et rendement en grains.....	70
3.2.	Concentration et absorption du phosphore par la plante	73
3.3.	Disponibilité du phosphore dans la rhizosphère	73
3.4.	Efficacité d'utilisation et d'absorption du phosphore EUP/EAP	74
3.5.	Rapport d'équivalence en terre (LER) et rapport de compétitivité (CR).....	75
4.	Discussion.....	76
5.	Conclusion	79

Chapitre IV

Test multilocal d'association céréales légumineuses dans l'agroécosystème algérien

1.	Introduction.....	81
2.	Matériel et méthodes	82

2.1.	Sites expérimentaux et zone d'étude.....	82
2.2.	Le matériel végétal utilisé et les conditions de croissance	84
2.3.	Echantillonnage des plants au moment de la floraison	85
2.3.1.	Mesures de la biomasse aérienne, racinaire et nodulaire	85
2.3.2.	Estimation du rendement en grain de pois chiche.....	86
2.4.	Analyse statistique et traitement des données.....	86
3.	Résultat	86
3.1.	Croissance de la plante et nodulation	86
3.2.	Le rendement en grain	91
3.3.	Efficiéce d'utilisation de la symbiose rhizobienne (EURS)	93
3.4.	Rapport d'équivalence en terre (LER)	96
4.	Discussion	96
4.1.	Effets des interactions sur les performances d'association pois chiche-blé dur .	97
4.2.	Effets de la carence en P sur le rendement en grains de pois chiches-blé dur	98
5.	Conclusion	99
	Conclusion générale et perspectives	99
	Références bibliographique	102

Introduction générale

Introduction générale

Le phosphore est un élément nutritif fondamental, indispensable à la croissance et au développement des plantes, jouant un rôle crucial dans les processus physiologiques essentiels tels que la photosynthèse, la respiration, et le transfert d'énergie (Morel, 2023). Dans de nombreux systèmes agricoles, sa disponibilité est souvent limitée, constituant une contrainte majeure pour la productivité des cultures. Les sols pauvres en phosphore (P) sont souvent caractérisés par un lessivage intense, une faible teneur en matière organique et des processus de fixation du P par les minéraux du sol. Cette déficience représente un défi pour les agriculteurs, particulièrement dans les systèmes de production à faibles intrants où la fertilisation phosphatée est très réduite en raison de contraintes économiques et environnementales. C'est pourquoi la recherche agronomique s'intéresse de plus en plus à l'évaluation du P du sol disponible pour les plantes (Morel, 2023).

En raison de sa faible mobilité dans le sol, en particulier dans les sols acides ou peu fertiles, le phosphore devient souvent un facteur limitant dans les systèmes agricoles. Cette carence se manifeste par un retard de croissance, une diminution de la biomasse et du rendement, ainsi qu'une réduction de la résistance des plantes aux autres stress abiotiques. Cela diminue leur capacité à absorber l'eau et les nutriments du sol. Les plantes carencées en phosphore montrent souvent des signes visibles sur les feuilles, comme une coloration pourpre ou bleutée sur la face inférieure des feuilles. Cette carence affecte directement la production de fruits et de graines, réduisant leur taille et leur nombre. L'efficacité d'absorption et d'utilisation du P par les plantes dépend également de leur capacité à établir des symbioses avec des micro-organismes du sol, tels que les mycorhizes et les rhizobiums, qui augmentent l'exploration racinaire et améliorent l'acquisition de cet élément essentiel. Une gestion adéquate de la fertilisation phosphatée et l'exploration des interactions symbiotiques dans les systèmes de cultures sont donc cruciales pour assurer une production végétale optimale et durable.

Les légumineuses alimentaires sont bien connues pour leurs symbioses rhizobienne et mycorhizienne. Elles occupent une place importante dans l'alimentation humaine et se distinguent par leur capacité à fixer l'azote atmosphérique. Cette fixation améliore non seulement la teneur en azote du sol, réduisant ainsi la dépendance aux engrais azotés, mais augmente également la fertilité du sol pour les cultures en rotation. Cependant, leur croissance et leur développement sont fortement influencés par la biodisponibilité du phosphore, un élément essentiel pour le développement nodulaire. Par conséquent, une carence en P peut limiter leur croissance ainsi que leur capacité à enrichir le sol en azote.

Dans les céréales, une carence en phosphore peut entraîner une réduction de la longueur de l'épi et du nombre de grains par épi, ce qui affecte le rendement final. Les racines de ces plantes deviennent plus courtes et moins efficaces pour absorber les nutriments.

Pour atténuer les effets de la carence en phosphore, plusieurs stratégies peuvent être mises en œuvre :

1. L'ajout de fertilisants phosphatés au sol peut compenser la carence. Il est important d'appliquer ces fertilisants de manière régulière pour assurer leur disponibilité.
2. Choisir des variétés de plantes tolérantes à la carence en phosphore permet de réduire les effets négatifs de cette carence. Ces variétés sont capables d'exploiter le phosphore disponible de manière plus efficace.
3. La pratique de la culture associée, en combinant des légumineuses et des céréales, contribue à la fertilité du sol en fixant l'azote, ce qui favorise la croissance des deux cultures associées.

L'association des légumineuses avec des céréales dans des systèmes de culture intercalaire représente une stratégie agricole potentiellement avantageuse pour améliorer l'efficacité d'utilisation des ressources, en particulier dans les contextes de déficience en phosphore. Dans ces systèmes, les légumineuses et les céréales interagissent de manière complémentaire. Les légumineuses, grâce à leur capacité à fixer l'azote atmosphérique, peuvent améliorer la nutrition azotée des céréales, tandis que les céréales, avec leur système racinaire plus profond et plus étendu, facilitent l'exploration du sol pour des nutriments tels que le phosphore. Cette complémentarité peut conduire à une utilisation plus efficace du phosphore disponible, même en conditions de déficience.

Dans un contexte de raréfaction des ressources naturelles et de changement climatique, l'adaptation des légumineuses à des conditions abiotiques défavorables, telles que la déficience en phosphore, devient un enjeu crucial pour la durabilité des systèmes agricoles. Les systèmes de culture associée légumineuses-céréales offrent un potentiel considérable pour atténuer les effets de la déficience en phosphore. En favorisant une meilleure exploration du sol et une utilisation plus efficace des ressources disponibles, ces systèmes peuvent améliorer la résilience des légumineuses face à cette contrainte. De plus, l'effet synergique entre légumineuses et céréales peut non seulement optimiser la nutrition phosphatée, mais aussi améliorer la productivité globale du système de culture, contribuant ainsi à une agriculture plus durable et résiliente.

L'adaptation des légumineuses alimentaires à la déficience en phosphore dans les systèmes de culture associée avec des céréales représente une voie prometteuse pour renforcer la durabilité

et la productivité des systèmes agricoles dans des environnements pauvres en ressources. Comprendre les mécanismes sous-jacents à cette adaptation et optimiser les pratiques de gestion agricole sont essentiels pour maximiser les bénéfices de ces systèmes innovants. Cette étude s'inscrit dans cette démarche, cherchant à éclairer les interactions complexes entre légumineuses et céréales, et à proposer des stratégies efficaces pour améliorer la résilience des légumineuses face à la déficience en phosphore. Comprendre ces mécanismes et mettre en œuvre des stratégies de gestion appropriées est essentiel pour améliorer la croissance et le rendement des cultures. La fertilisation, la sélection de variétés résistantes et l'adoption de systèmes de cultures associées sont des approches efficaces pour atténuer les effets de la carence en phosphore et promouvoir une agriculture durable.

Ce travail s'inscrit dans ce contexte en étudiant l'adaptation de la symbiose rhizobienne d'une légumineuse alimentaire (le pois chiche) à la déficience en phosphore dans les systèmes céréaliers, notamment la culture intercalaire. Le document est divisé en quatre chapitres. Le premier est consacré à une synthèse bibliographique, le deuxième examine la croissance, la nodulation et le rendement des géotypes de pois chiche cultivés sous déficience en phosphore, le troisième analyse l'association pois chiche-blé dur et leur adaptation à la déficience en phosphore, et enfin, le quatrième chapitre étudie le comportement des géotypes de pois chiche associés à une céréale dans deux sites expérimentaux, l'un suffisant en phosphore et l'autre déficitaire.

Synthèse bibliographique

Chapitre I: Synthèse bibliographique

I. Aspect général sur la situation des grandes cultures en Algérie

Les grandes cultures, notamment les céréales et les légumineuses alimentaires, sont des produits alimentaires de première nécessité dans l'agriculture algérienne, d'où elles constituent la consommation de base, estimée à environ 228 kg/habitant/an pour les céréales et 8 kg/habitant/an pour les légumes secs (Ait Abdellah Djennadi et al., 2010). Cependant, leur production est faible et ne répond pas aux besoins du pays, qui sont comblés par les importations. Beaucoup de contraintes entravent le développement de ces spéculations, qui sont généralement basées sur un mode de culture pluviale et traditionnel, mis à part la répartition spatiale, dont une sole d'une moyenne annuelle de 3 millions d'hectares est laissée sans exploitation, en jachère (ITGC, 2017), représentant environ 40 % de la surface agricole utile. La résorption de cette jachère est devenue une nécessité stratégique afin de garantir la sécurité alimentaire face à l'instabilité de l'offre sur le marché mondial (Drevon et al., 2009).

En 2013, selon le Centre national d'informatique et des statistiques, la production céréalière algérienne avait atteint 41,1 millions de quintaux au niveau national, avec 3,77 millions de tonnes de quantité importée durant la même période, alors que les besoins nationaux en céréales sont estimés à environ 80 millions de Q/an, ce qui classe l'Algérie parmi les plus importants pays importateurs de céréales au monde (CNIS, 2014 ; Feddal, 2015), entraînant une insécurité alimentaire et une faiblesse de la production céréalière nationale. Selon les statistiques de la FAO, la répartition céréalière algérienne est de 19 millions de quintaux de blé (60 %) et 13 millions de quintaux d'orge (40 %) (FAO, 2023).

Ainsi, les légumineuses alimentaires constituent une très importante source de protéines végétales, pouvant corriger le déficit en protéines animales. De plus, elles sont riches en minéraux essentiels et en lysine, complétant ainsi les profils nutritionnels des céréales (Duranti et Gius, 1997). Elles fournissent, pour l'alimentation humaine, 32 % des protéines végétales, 32 % des matières grasses et 7 % des glucides. Pour l'alimentation animale, elles fournissent 38 % des protéines, 16 % des lipides et 5 % des glucides (Neyra, 1992). Actuellement, la superficie mondiale cultivée en légumes secs (haricot, pois chiche, lentille...) est d'environ 89,06 millions d'hectares, produisant 88,37 millions de tonnes (FAO, 2023).

En plus de leur importance dans le régime alimentaire humain et animal, elles revêtent un intérêt particulier dans le concept de l'agriculture durable. Leur introduction dans l'assolement permet

la rotation des cultures, la diversification des productions et la protection du sol contre l'érosion. L'introduction de ces espèces dans un système de culture est impérativement tributaire de l'amélioration de leurs performances agronomiques (Ben Mbarek et al., 2009). Utilisées en rotation ou en association dans les systèmes de culture, elles apportent une contribution en azote en fixant et intégrant une partie de l'azote atmosphérique dans le système (Bado, 2002). Dans les systèmes de culture utilisant les rotations, l'azote fixé par les légumineuses peut d'abord être utilisé par elles-mêmes, puis par les cultures suivantes, qui bénéficient indirectement des résidus qu'elles laissent (Baudoin, 2001).

Les légumineuses alimentaires en Algérie ont toujours occupé, en termes de superficie, le troisième rang après les céréales et les fourrages. Leur superficie, qui était de l'ordre de 90 mille ha, représentant 0,21 % de la superficie agricole totale en 2014, a augmenté jusqu'à 119 mille ha en 2019 (FAO, 2023). Les espèces les plus cultivées sont, dans l'ordre, la fève, la féverole, le pois chiche, le pois sec, les lentilles et le haricot sec. De la zone littorale jusqu'aux hauts-plateaux, on trouve l'ensemble des espèces telles que la fève, la féverole, le pois chiche, le pois sec, le haricot et la lentille. En ce qui concerne la fève, elle est principalement cultivée dans les zones littorales et sub-littorales, à l'Ouest, dans les wilayas de Tlemcen, Mascara, Relizane, Ain-Temouchent, Sidi-Bel-Abbès, Mostaganem et Chlef, et à l'Est, à Skikda, Bejaia et Guelma. Elle est aussi cultivée dans la région de Biskra (Lazali, 2014).

Le pois chiche (*Cicer arietinum* L.), l'une des plus importantes légumineuses à graines domestiquées par l'homme à travers les civilisations, a réussi à conquérir plusieurs régions du monde, dont la partie septentrionale de l'Afrique, qui constitue un centre de diversité génétique de cette espèce (Zine-Zikara et al., 2015). En Algérie, le pois chiche se trouve également dans les zones littorales et les plaines intérieures. À l'Ouest, cette espèce est cultivée à Ain Temouchent, Tlemcen et Sidi-Bel-Abbès, tandis qu'à l'Est, on la trouve à Skikda, Guelma (littoral et sub-littoral) et Mila (plaines intérieures). Ce sont les deux zones les plus importantes pour la culture du pois chiche (Lazali, 2014).

II. Généralité sur le pois chiche et blé dur

1. La production et la répartition de la culture de pois chiche et blé dur

La production mondiale de pois chiche a connu, durant la dernière décennie, une tendance à l'augmentation relativement marquée avec un taux de croissance de 76 % et une production moyenne décennale d'environ 12 millions de tonnes, contre environ 8 millions de tonnes pour la décennie précédente. En revanche, les superficies consacrées n'ont augmenté que de 26 %, avec une moyenne décennale de 12 millions d'hectares (Tableau I.1. FAO, 2012-2022).

Tableau I.1 : Récapitulatif des productions (t), des superficies (ha) moyennes mondiales et maghrébines de pois chiche entre 2012 et 2022

	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
	Algérie										
Production(t)	27655	29320	35118	24903	21572	29371	38274	40369	39888	38818	37990.52
Superficie(ha)	30562	34980	33295	25497	22961	28571	32065	36206	36743	36520	33835
	Tunisie										
Production(t)	4900	4420	3841	7918	5000	4900	4773	4879	8045	10239	11143
Superficie(ha)	5399	5500	4801	7922	6500	6300	5618	5638	6561	6800	7237
	Maroc										
Production(t)	33499	25004	62499	65559	44062	25364	36312	75413	49714	72547	30953.95
Superficie(ha)	50560	57019	72564	59472	88030	34091	86800	81982	53599	63411	60985
	Monde										
Production(t)	11590712	13016719	13229957	11222430	12302479	14146823	16135405	14246295	15086283.79	15937557.79	18095248.28
Superficie(ha)	12368637	12445151	13653841	12006504	12869779	14565994	15393357	13718980	13583124	14140866	14810916

Source : FAO, 2023

En Algérie, le pois chiche occupe la deuxième position après la fève-fêverole. La majeure partie des superficies cultivées de cette espèce est concentrée à l'ouest du pays, particulièrement dans les régions de Tlemcen et Ain-Temouchent, qui sont caractérisées par un climat humide à subhumide. Cette espèce est cultivée sur une superficie annuelle moyenne de 33 000 ha, soit 36,78 % de la superficie des légumineuses à graines. La production est caractérisée par des fluctuations interannuelles, de l'ordre de 351 000 quintaux, avec un rendement moyen de 10 q/ha (MADR, 2020). Les variations de la production de pois chiche d'une année à l'autre sont dues principalement aux stress biotiques et abiotiques. La mauvaise répartition des précipitations dans l'espace et dans le temps représente le principal facteur limitant la production des légumineuses alimentaires en général, conduites en culture pluviale. En année sèche, des surfaces considérables sont déclarées non productives, ce qui provoque des fluctuations interannuelles des surfaces emblavées. Cette situation rend, dans certains cas, les

agriculteurs hostiles à l'introduction des légumineuses alimentaires dans leur assolement (Lazali, 2014).

Les céréales tiennent de loin la première occupation des terres agricoles et servent d'aliment de base pour la majorité de la population mondiale. En Algérie, tout comme dans les pays du Maghreb, le blé dur représente la principale culture et alimente plusieurs activités de transformation. En effet, la consommation individuelle était évaluée, en 2000, à 205 kg/an en Tunisie, 219 kg/an en Algérie et 240 kg/an au Maroc (Boulal et al., 2007).

La production mondiale de blé dur a connu une fluctuation au cours de la dernière décennie, conditionnée par les aléas climatiques, passant de 673 millions de tonnes en 2012 à 808 millions de tonnes en 2022 (FAO, 2023). Le blé dur reste ainsi la céréale prépondérante en Algérie, bien adaptée aux conditions locales. Sa production progresse au même rythme que celle du blé tendre, avec 19 millions de quintaux pour le blé dur contre 8 millions de quintaux pour le blé tendre. La production de blé dur en Algérie a également marqué une irrégularité durant la période 2012-2022, atteignant 34 millions de quintaux en 2012, diminuant à 21 millions de quintaux en 2021, puis augmentant à 39 millions de quintaux en 2018 (Tableau I.2).

Tableau I.2 : Récapitulatif des productions (t), des superficies (ha) moyennes mondiales et maghrébines de blé dur entre 2012 et 2022

	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Algérie											
Production(t)	3432231	3299049	2436197	2656731	2440097	2436503	3981219	3876876	3106754	2168386	3000000
Superficie (ha)	1945776	1727242	1651311	1814722	2062179	2118469	2087003	1974987	1848083	1368702	1821702
Tunisie											
Production(t)	1523300	975490	1513000	912570	926592	1104300	1075400	1440000	1042000	1193000	1135000
Superficie (ha)	754000	667500	722880	652530	508375	675000	619000	643000	606000	611000	579000
Maroc											
Production(t)	3878000	6933983	5115884	8075659	2731123	7090817	7320620	4025303	2561897.5	7543847.9	2707652.17
Superficie (ha)	3142000	3204231	2986158	3273869	2413638	3384225	2842748	2505987	2845290	2864567	2436350
Monde											
Production(t)	673729410	710398667	728757761	742029713	748494478	772295897	733386177	765769635	757023106.83	772779429.72	808441568.1
Superficie (ha)	21717932	218870212	219755320	223413527	219018037	218299828	213981968	215901958	217887887	220425413	219153830

Source : FAO, 2023

2. Le pois chiche

2.1. Classification botanique de la culture de pois chiche

Le pois chiche *Cicer arietinum* L. est une plante diploïde autogame ($2n=2x=16$), annuelle, avec un génome de taille moyenne d'environ 750 Mbp (Arumuganathan et Earle, 1991 ; Vail, 2005). Communément appelé gram ou garbanzo, il est l'une des premières cultures céréalières cultivées par l'homme et a été mis au jour dans des sites archéologiques du Moyen-Orient datés du VIII^e millénaire avant J.-C. (Zohary et Hopf, 2000). Selon l'APG III (2009), le pois chiche appartient à la classification suivante :

Règne : Plantae.

Embranchement : Spermatophyta (plantes à graines)

Sous embranchement : Magnoliophyta (=angiospermes, phanérogames ou plantes à fleurs)

Classe : Magnoliopsida.

Sous-classe : Rosidae.

Ordre : Fabales.

Famille : Fabaceae. **Genre :** *Cicer*

Espèce : *Cicer arietinum* L.

2.2. Caractéristiques agro-morphologique de pois chiche et aire de dispersion

Le pois chiche (*Cicer arietinum* L.) est une légumineuse alimentaire annuelle autogame herbacée, présentant moins de 1 % d'hybridation naturelle (Singh et Reddy, 1991). C'est une plante haute de 20 à 50 cm, à port dressé, cultivée pour ses graines rondes contenues au nombre de 1 ou 2 dans des gousses. La tige est herbacée. Selon les génotypes de pois chiches, à une certaine hauteur, la tige se ramifie en deux ou trois branches pour donner des ramifications secondaires, puis des ramifications tertiaires (Braun et al., 1988), avec des fleurs zygomorphes articulées qui s'insèrent sur des pédoncules axillaires. L'apparition des premières fleurs dépend de plusieurs facteurs tels que la précocité de la variété, la date et la densité du semis, ainsi que des techniques culturales. Les premières fleurs, dites pseudo-fleurs, sont imparfaites et ne produisent pas de gousses (Roberts et al., 1980). Le fruit est une gousse globuleuse, renflée, ovale, velue, pendante et portant un bec. Elle peut contenir de 1 à 3 grains, lisses ou ridés, arrondis ou irréguliers.

Le pois chiche est une espèce rustique, notamment grâce à son système racinaire puissant qui se développe à la fois latéralement et en profondeur, pouvant dépasser un mètre (Ben Mbarek et al., 2009). Ce système lui permet d'explorer un grand volume de sol et lui confère une tolérance à la sécheresse (Slama, 1998). La racine principale pivotante peut atteindre un mètre de profondeur, accompagnée de racines secondaires traçantes. La profondeur de l'enracinement

dépend des techniques culturales et des caractéristiques du sol. Par exemple, la semelle de labour peut entraver l'élongation de la racine principale. Dans les sols humides, salins, lourds, ou mal drainés, les racines ont un développement limité, et la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique est réduite (Jaiswal et Singh, 2001). Les nodules présents sur les racines permettent la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique, couvrant jusqu'à 80 % des besoins en azote de la plante.

Le pois chiche (*Cicer arietinum* L.) est une ancienne légumineuse cultivée pour la première fois en Turquie, vers 7 000 avant J.-C. On pense qu'il a été domestiqué à partir d'une espèce sauvage apparentée dans cette région. Après la domestication, cette culture s'est répandue au Moyen-Orient, en Méditerranée, en Inde et en Éthiopie (Van der Maesen, 1987 ; Singh, 1997). Son introduction en Amérique latine (Mexique, Argentine, Chili, Pérou), en Australie et aux États-Unis est plus récente (Duc, 1997). Aujourd'hui, le pois chiche est largement cultivé en Asie du Sud et dans la région méditerranéenne (Saxena, 1990 ; Singh et Ocampo, 1997 ; Sharma et Muehlbauer, 2007), et se classe troisième parmi les légumineuses les plus cultivées, avec une superficie de 13 millions d'hectares et une production totale de 14 millions de tonnes (FAO, 2023). Au fil du temps, il s'est diversifié en deux races : le groupe macrosperma ou type Kabuli à l'ouest, et le groupe microsperma ou type Desi au sud-est (Harlan et Wet, 1971 ; Wang et al., 2009).

- Type Kabuli : Appelé aussi Garbanzo, il se caractérise par un feuillage variant du vert clair au vert foncé et une floraison blanchâtre. Ce type a un port érigé, facilitant la mécanisation de la récolte. La hauteur de la plante varie généralement de 30 à 90 cm, mais elle peut dépasser un mètre dans des conditions favorables. Les grains sont de couleur crème, couverts d'un tégument fin. Le Kabuli se divise en deux sous-groupes : le gros Kabuli, dont les grains ont un diamètre de 8 à 9 mm et un poids de mille grains allant de 410 à 490 g, et le petit Kabuli, avec des grains d'environ 7 mm de diamètre et un poids de mille grains d'environ 265 g (Ahmad et al., 2005). Ce type est sensible au gel, au froid et aux maladies fongiques, et nécessite des conditions climatiques favorables lors du semis (Jaiswal et Singh, 2001).

- Type Desi : Ce type présente un feuillage tendant au vert violacé et une floraison violacée. Il a un port retombant et un aspect touffu. Les grains, plus petits et irréguliers, ont une surface ridée couverte d'un tégument épais, de couleur foncée variant du marron au noir. Le poids de mille grains varie de 100 à 130 g (Erlor et al., 2009 ; Babar et al., 2009).

Un troisième type intermédiaire, appelé Gulabi, a été identifié par ses grains lisses de couleur claire, semblables à ceux du pois avec un bec (Wery et al., 1986). Le poids de 100 graines se situe entre 15 et 25 g, et il prédomine en Asie (Plancquart et Wery, 1991).

Wery (1990) a classé les géotypes de pois chiche en trois catégories en fonction de leur résistance au gel : le pois chiche d'automne, d'hiver, et de printemps, respectivement résistants, tolérants et sensibles au gel. En Algérie, deux types de cultures sont distingués : le pois chiche d'hiver et le pois chiche de printemps, avec des dates de semis variant selon le type culturel et la région bioclimatique.

- Culture de printemps : Dans les zones bioclimatiques subtropicales, arides et semi-arides des régions méditerranéennes, le pois chiche est semé en automne ou au printemps. Dans le bassin méditerranéen, il est conduit en culture pluviale de printemps, où les précipitations annuelles varient de 350 à 600 mm (Singh, 1997 ; Bamouh et al., 2002). Le semis de printemps est effectué entre fin février et début mars, avec une récolte fin juin ou début juillet (Slama, 1998). Cette culture repose sur l'humidité résiduelle du sol et est exposée à la sécheresse lors de la formation des gousses et du remplissage des grains (Saccardo et Calcagno, 1990). Les hautes températures et le manque d'eau raccourcissent le cycle de croissance à trois ou quatre mois (Bamouh et al., 2002).
- Culture d'hiver : Le pois chiche d'hiver remplace la jachère, profitant des précipitations hivernales et échappant aux gelées printanières. Le semis est avancé vers novembre-décembre, avec une récolte en juin (Bamouh et al., 2002). Ce semis précoce allonge le cycle phénologique et favorise le remplissage des gousses, augmentant ainsi le rendement (Gan et al., 2002). La fixation symbiotique de l'azote est plus élevée chez le pois chiche d'hiver que chez celui de printemps. Selon Soltani et al. (2012), le pois chiche d'hiver présente un cycle biologique long, un rendement élevé, une meilleure efficacité de l'eau, ainsi qu'un port érigé et une hauteur favorisant la mécanisation et la lutte contre les mauvaises herbes.

2.3. Aspect sur le matériel génétique de pois chiche sélectionné en Algérie

Le problème de la disponibilité des semences de pois chiche, tant sur le plan quantitatif que qualitatif, remonte aux années 1980. Cette situation est liée à l'absence d'une stratégie efficace pour la multiplication des semences de variétés sélectionnées, ainsi qu'à l'absence d'un dispositif organisationnel de réglementation encadrant la production et le contrôle de la certification des semences. Ce manque de cadre institutionnel a freiné le développement de la production de semences en Algérie. Le matériel végétal disponible est généralement peu productif et vulnérable aux différents stress biotiques et abiotiques (ITGC, 2017).

À ce jour, un certain nombre de variétés sont mises en production dans les zones de culture, tandis que d'autres variétés récemment introduites sont intégrées dans le programme de multiplication des semences en milieu producteur (voir Tableau I.3).

Tableau I.3 : Liste des principales variétés de pois chiche cultivées en Algérie (ITGC, 2017)

	Nom variétale	Nom commun	Classification	Origine
Légumineuse alimentaire : Pois chiche	Flip 84/92C	Beni chograne	Variété en multiplication	Inde
	Flip 90/13C	Serraidi	Variété en multiplication	ICARDA
	ILC 32/79	Chetoui 1	Variété en multiplication	Russie
	ILC 482	Chetoui 2	Variété en multiplication	ICARDA
	Flip 07/96C	Tikejda	Variété en multiplication	ICARDA
	Flip 05/43C	Tafna	Variété en multiplication	ICARDA
	Flip 07/268	Beni Aziz	Variété en multiplication	ICARDA
	Flip 08/38C	Beni Hamiden	Variété en multiplication	ICARDA
	Flip 93/93C	Ghab 04/Oued	Variété introduite	ICARDA
	Flip 88/85C	Rhumel	Variété introduite	ICARDA
	Flip 01/29C	Ghab 05/Ain Zada	Variété introduite	ICARDA
	Flip 08/42C	Makerra	Variété introduite	ICARDA
	Flip 97/706C	El Ogbane	Variété introduite	ICARDA
			Variété locale	
		Ain Temouchent	Variété locale	
	Sabdou	Variété locale		
	Rabat 9	Variété locale		

Les critères de choix des variétés de pois chiche par ordre d'importance sont ;

- L'adaptation aux conditions agro écologiques de la zone de production,
- Le temps de cuisson,
- La taille, la couleur des graines et le calibrage,
- La production variétale et les rendements.

En Algérie, le pois chiche est un aliment consommé très fréquemment. Cependant, la production nationale ne couvre que 14 % des besoins, ce qui est loin de satisfaire la demande d'une population de plus de 40 millions d'habitants. La superficie cultivée en pois chiche représente environ 36,78 % de la sole totale des légumineuses alimentaires, mais le rendement reste faible, avec seulement 10 q/ha en 2013 (ITGC, 2014). Afin d'augmenter la production nationale, une extension de la superficie cultivée a été mise en place, notamment par l'introduction de génotypes de pois chiche dans de nouvelles régions du pays, généralement caractérisées par des sols pauvres en phosphore assimilable.

2.4. Importances de la culture de pois chiche

L'association de la bactérie du genre **Rhizobium** avec les racines des légumineuses définit une symbiose rhizobienne, qui résulte de mécanismes complexes de reconnaissance entre les deux organismes. Cela aboutit à la formation de nodosités sur les racines, où la bactérie se différencie en bactéroïdes capables de fixer l'azote atmosphérique. Les légumineuses symbiotiques, grâce à cette interaction, offrent des avantages potentiels sur les plans technique, économique et environnemental. Actuellement, la culture des légumineuses nodulées répond à des attentes socio-économiques croissantes, car elles constituent la base d'un système de production végétale et animale plus durable, prenant en compte les coûts des intrants et les impacts environnementaux (Bargaz, 2012).

Dans les grandes cultures, telles que les céréales, les légumineuses nodulées apportent des bénéfices complémentaires, notamment par l'augmentation de la minéralisation dans la rhizosphère et l'amélioration de l'efficacité de la culture suivante vis-à-vis de l'azote, ainsi qu'une augmentation de la disponibilité en phosphore assimilable, que ce soit pour elles-mêmes ou pour les cultures suivantes ou en association. Sous déficience en phosphore rhizosphérique, la fixation symbiotique de l'azote est en partie associée à l'acidification de la rhizosphère, ce qui améliore l'assimilation des éléments minéraux, en particulier le phosphore (Schulze et Drevon, 2005).

En effet, les légumineuses nodulées contribuent non seulement à une gestion optimisée de l'azote, mais aussi à une réduction des risques de perte d'azote dans l'environnement. Cette symbiose favorise également une meilleure minéralisation des pailles et rhizodépôts, améliorant ainsi l'efficacité de la culture suivante, notamment en termes de disponibilité en azote. En plus de cela, les légumineuses augmentent la disponibilité du phosphore assimilable pour elles-mêmes, ainsi que pour les cultures suivantes ou celles en association (Li et al., 2007).

Cette symbiose établit une relation privilégiée avec la rhizosphère, qui entoure leurs racines. En plus de ces caractéristiques, des études récentes ont commencé à explorer l'impact rhizosphérique de cette symbiose, qui semble stimuler la production d'enzymes solubilisant le phosphore, ainsi que favoriser la croissance de certains microorganismes (mycorhizes et bactéries) dotés de fortes capacités de solubilisation du phosphore (Rifat et al., 2010).

2.4.1. Intérêt d'activité rhizobienne

La biodiversité microbienne constitue une ressource naturelle considérable pour l'humanité. Les **Rhizobium** sont des bactéries du sol capables d'induire des nodules sur les racines ou les tiges des légumineuses, et d'assurer la fixation de l'azote atmosphérique à l'intérieur de ces organes. En contrepartie de cette fixation d'azote, les rhizobiums obtiennent un approvisionnement stable en carbone, dérivé des composés issus de la photosynthèse (Longfei et al., 2010). Les rhizobia, ou bactéries nodulant les légumineuses, étaient initialement classés en fonction de leur capacité à noduler un groupe spécifique de plantes, ce qui a permis de reconnaître six espèces distinctes. Selon l'ancienne classification des rhizobia proposée par Neyra (1992), différents types de *Rhizobium* sont distingués.

Tableau I.4 : Types de Rhizobias nodulant des légumineuses (Neyra, 1992)

Espèces	Plantes hôtes
<i>Rhizobium leguminosarum</i>	Pisum, Vicia, Cicer, Lens, Lathyrus
<i>Rhizobium phaseoli</i>	Espèces tempérées de Phaseolus
<i>Rhizobium trifolii</i>	Trifolium
<i>Rhizobium meliloti</i>	Medicago, Melilotus, Trigonella
<i>Rhizobium japonicum</i>	Glycine
<i>Rhizobium lupine</i>	Lupinus, Ornithopus

2.4.2. Symbiose légumineuse –rhizobia

La symbiose entre *Rhizobium* et légumineuse est un processus indispensable à la plante pour acquérir l'azote sous forme réduite, mais aussi aux rhizobia pour obtenir les nutriments nécessaires à leur développement (Raven et al., 2000). Dans les associations symbiotiques, la

plante représente l'hôte, tandis que le partenaire bactérien est le symbionte. Chez les légumineuses, les rhizobia s'installent dans les racines des plantes. Le végétal fournit des nutriments à la bactérie, et celle-ci capte l'azote de l'air et le transfère à son hôte (Pousset, 2003).

L'optimisation de la symbiose entre les légumineuses et le microsymbionte exige la présence, dans la rhizosphère, de souches compatibles, compétitives et infectives, qui sont hautement efficaces pour la fixation de l'azote et présentes en nombre suffisant pour maximiser la nodulation (Vessey et Chemining, 2006).

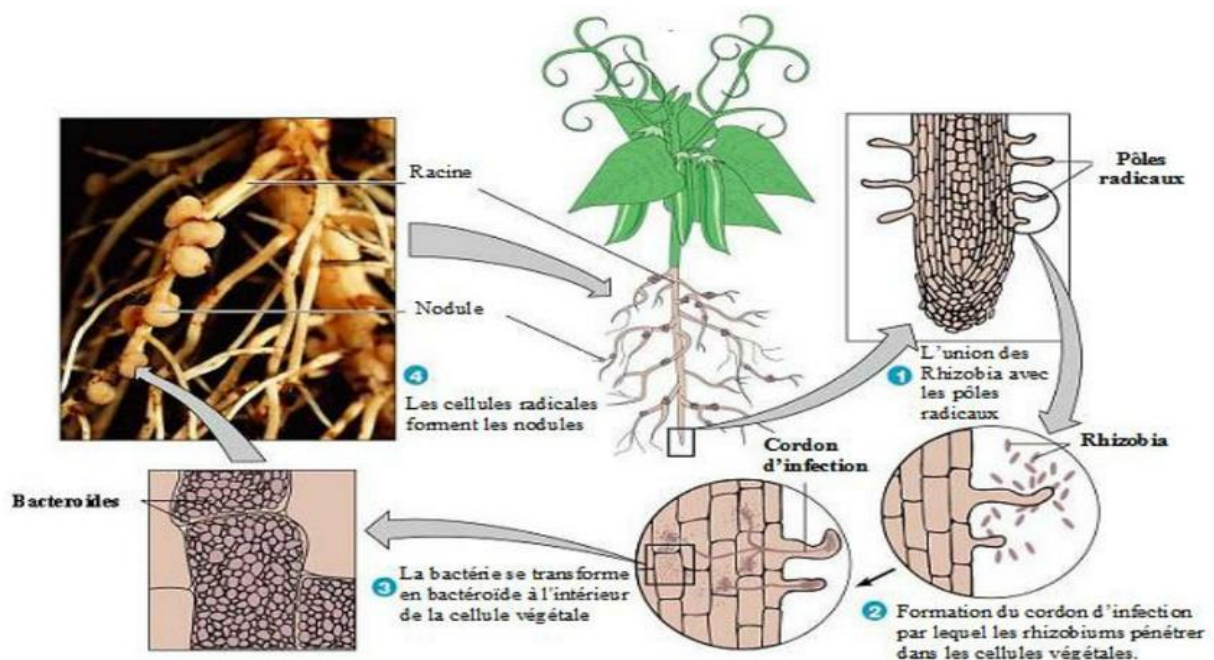


Figure I.1: différentes étapes de l'établissement de la symbiose rhizobia –légumineuse (Faghire, 2012).

2.4.3. Le processus de la nodulation

L'établissement de la symbiose est un phénomène complexe qui se développe à travers une série d'événements et de transformations ordonnées. La formation des nodules résulte généralement d'une infection de la plante par les rhizobia, induisant la dédifférenciation et la division des cellules du cortex. La structure, la forme et la taille des nodosités varient selon les partenaires de la symbiose (Alkama, 2010). Les nodules de type indéterminé (ex. *Pisum sativum*, *Vicia faba*) se forment à partir du cortex interne, tandis que les nodules de type déterminé (ex. *Phaseolus vulgaris*, *Cicer arietinum*) se forment à partir du cortex externe. Chez les espèces à nodules de type déterminé, la persistance du méristème est très éphémère, et la croissance en longueur du nodule est limitée. Une croissance en épaisseur a lieu par hypertrophie des cellules

corticales et par division des cellules déjà infectées par les rhizobia. Ce processus conduit à une forme sphérique et à un état de différenciation uniforme pour toutes les cellules. En revanche, chez les espèces à nodules de type indéterminé, la zone méristématique est persistante, ce qui entraîne une forme allongée. La formation d'une nodosité se déroule en plusieurs étapes importantes :

a. Pré-infection : Une courbure est provoquée au niveau des poils absorbants par l'acide indole-acétique produit par les rhizobia, qui se multiplient dans la rhizosphère grâce aux exsudats racinaires.

b. Infection : Un cordon d'infection se développe à l'intérieur du poil absorbant, se ramifiant et traversant la paroi pectocellulosique jusqu'au cortex racinaire. La différenciation méristématique des cellules corticales permet la naissance et la croissance nodulaire. Le cordon d'infection se ramifie tandis que les rhizobia se multiplient.

c. Maturation : En dehors du cordon infectieux, les bactéries se libèrent et se divisent dans le cytoplasme de l'hôte, subissant par la suite des changements morphologiques avec une augmentation de leur taille, devenant des bactéroïdes. En parallèle, les cellules racinaires de la plante hôte augmentent également de taille.

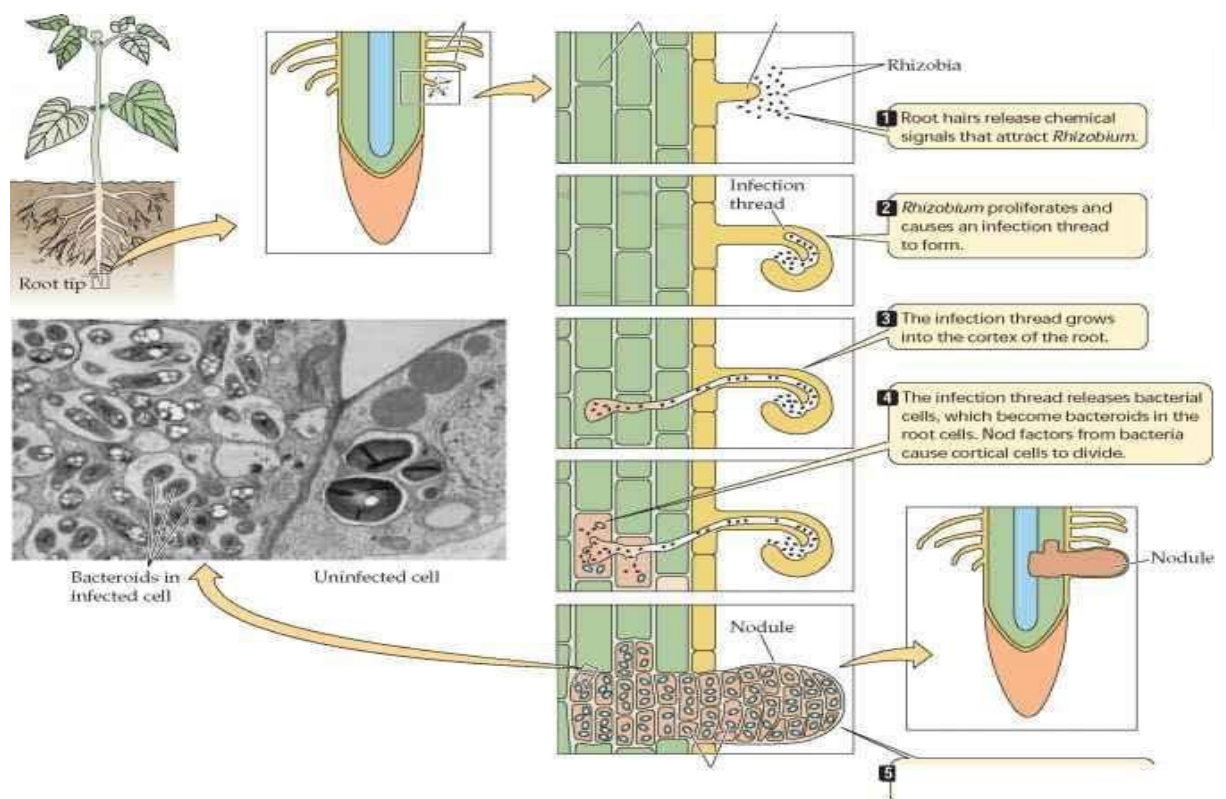
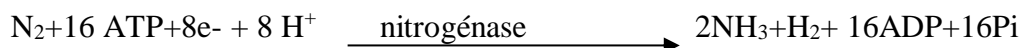


Figure I.2 : Etapes précoces du développement d'un nodule racinaire (Domergue, 2017)

2.4.4. Le fonctionnement nodulaire et le déroulement de la FSN

La fixation symbiotique de l'azote (FSN) se réalise à travers plusieurs mécanismes, dont le plus important et le plus connu est la fixation biologique par des micro-organismes libres ou vivant en symbiose avec certaines plantes, comme les légumineuses (Stevenson, 1984 ; Bargaz, 2012). Le processus de la FSN consiste en la réduction de l'azote atmosphérique sous forme ammoniacale, selon le bilan global de la réaction catalysée par la nitrogénase (Dommergues et al., 1999 ; Alkama, 2010). Ce processus exige donc la présence de la nitrogénase, d'énergie et d'un pouvoir réducteur, selon la formule suivante :



La nitrogénase est un complexe enzymatique constitué, d'une part, de la dinitrogénase, qui est une protéine I et constitue le site actif de la réduction du N_2 en NH_3 . D'autre part, elle comprend la dinitrogénase réductase, une protéine II, qui est le composant le plus sensible à l' O_2 et qui assure le transfert des électrons nécessaires à la réduction du N_2 , depuis un donneur vers la dinitrogénase. L'énergie nécessaire aux processus enzymatiques pour la réduction de l'azote atmosphérique en ammonium est fournie par l'activité photosynthétique.

2.4.5. La fixation nodulaire de N_2 des légumineuses et les besoins en P

Après avoir infecté les légumineuses au niveau de la courbure en crosse d'un poil absorbant ou d'une cellule épithéliale proche de l'émergence d'une racine latérale, les rhizobia se multiplient dans le cordon d'infection qui progresse entre les cellules du parenchyme cortical. Simultanément, certaines cellules deviennent polyploïdes et intègrent les rhizobia par endocytose lorsque le cordon d'infection les atteint. Il en résulte un organite nommé symbiosome, composé de : i) un ou plusieurs rhizobia transformés en bactéroïdes capables de fixer le N_2 grâce à la nitrogénase ; ii) une membrane pér bactéroïdienne (MPB) d'origine plasmalemmique enrichie en protéines spécifiques. Ainsi, une cellule infectée peut contenir plus de 10 000 bactéroïdes (Drevon, 2018). En conséquence, l'organogenèse nodulaire immobilise de grandes quantités de P dans les membranes phospholipidiques et les acides nucléiques bactériens et végétaux. Ainsi, Vadez et al. (1997) ont trouvé des concentrations en P trois fois plus élevées dans les nodules que dans les racines et les parties aériennes. Durant la croissance végétative de la légumineuse, les nodules peuvent consommer jusqu'à 20 % des photosynthétats (dont la moitié est respirée en CO_2 , bien que jusqu'à 30 % de ce CO_2 puisse être réassimilé via une phosphoénolpyruvate carboxylase spécifique des nodules). Cette enzyme contribue à la synthèse de malate pour la respiration bactéroïdienne, et d'aspartate pour

la synthèse d'acides aminés à partir du N₂ fixé. L'asparagine ou des uréides sont ensuite transportés par voie xylémique vers les autres organes de la légumineuse pour la synthèse de protéines et d'autres composés azotés, soutenant ainsi sa croissance (Drevon, 2018).

2.4.6. La fixation nodulaire de N₂ des légumineuses et les besoins en O₂

Il existe dans le fonctionnement de la symbiose fixatrice de l'azote chez les légumineuses un certain antagonisme entre les besoins importants en oxygène, nécessaires aux chaînes respiratoires pour fournir l'ATP à la nitrogénase, et la sensibilité de cette enzyme à l'oxygène, qui inhibe son fonctionnement (Gerard, 1993 ; Alkama, 2010). Drevon et al. (1987) ont montré qu'à de très fortes pressions d'oxygène externe (45,5 et 60 % d'O₂), la nitrogénase n'est pas altérée, mais présente une activité légèrement inférieure à l'optimum.

2.4.7. Les conditions influant l'activité symbiotique et la fixation de l'azote

Différents facteurs peuvent influencer l'activité symbiotique et la fixation de l'azote. La nature du sol et la disponibilité des éléments nutritifs impactent l'activité des rhizobiums et de la plante ainsi que l'efficacité de l'activité symbiotique (Babo, 2002). Ainsi, le manque de phosphore limite sévèrement la formation des nodules et la fixation de l'azote. La richesse du sol en azote est un facteur inhibiteur de la fixation biologique, car il existe une relation négative entre l'azote minéral contenu dans le sol et le taux de fixation. Une déficience en eau provoque une diminution significative du nombre et du rendement des nodules (Mnasri et al., 2007).

3. Le blé dur

3.1. Classification botanique de la culture de blé dur

Les blés, au sens large, appartenant tous au genre *Triticum*, ont connu une histoire évolutive remarquable marquée par plusieurs événements d'allopoloïdisation, conduisant à des espèces modernes avec des niveaux de ploïdie variés. Parmi elles, on retrouve des espèces diploïdes telles que l'engrain (*Triticum monococcum*), des tétraploïdes comme le blé dur (*Triticum durum*), et des hexaploïdes comme le blé tendre (*Triticum aestivum*) ou l'épeautre (*Triticum spelta*). Toutes ces espèces cultivées partagent une histoire évolutive commune et une grande partie de leur génome (Marcussen et al., 2014 ; Taulemesse, 2015). Selon la classification de Cronquist (1981) et APG III (2009), le blé est une graminée appartenant à la famille des Poaceae, classée comme suit :

- **Règne** : *Plantae*
- **Embranchement** : *Tracheobionta* **Sous-embranchement** : *Magnoliophyta*
- **Classe** : *Liliopsida* **Ordre** : *Poales*
- **Famille** : *Poaceae* **Genre** : *Triticum* L.

3.2. Caractéristique agro-morphologique de blé dur et aire de dispersion

Le blé est une plante herbacée annuelle monocotylédone à croissance définie et feuilles alternes, presque strictement autogame. L'espacement des variétés de seulement 2,5 m permet de constater une pollinisation croisée limitée à 0,03 % (Rieben et al., 2011). La plante est constituée d'un ensemble de brins appelés talles. Chaque talle est une entité comprenant une tige feuillée, qui constitue la partie végétative, un épi qui est la partie reproductrice, ainsi qu'un système racinaire. La première talle émise, issue du bourgeon apical, est appelée maître-brin, tandis que les suivantes, issues de bourgeons axillaires, sont appelées talles secondaires. Les talles secondaires, ramifications du maître-brin, sont émises depuis des bourgeons situés à la base de la plante au niveau du plateau de tallage. L'émission des talles secondaires intervient selon un ordre chronologique au cours du développement de la plante (Taulemesse et al., 2015). Le grain de blé (caryopse) est un fruit sec indéhiscent dont la graine (amande) est soudée à l'enveloppe (péricarpe) par son tégument. Il est principalement composé d'une enveloppe (péricarpe), d'un embryon, ainsi que de tissus nourriciers regroupés sous la dénomination d'albumen, comprenant l'albumen amylicé. Le grain est principalement constitué d'amidon (environ 65 %), de protéines (entre 10 % et 15 %), d'eau (environ 15 %), ainsi que de lipides, de cellulose et de divers micro-éléments. L'albumen contient la totalité de l'amidon du grain ainsi que près de 90 % de ses protéines. Il représente de 80 à 85 % de la masse totale du grain (Taulemesse et al., 2015).

Selon les statistiques mondiales calculées par le Conseil International des Céréales (CIC, 2023), la production mondiale de tous les types de blé est de 803 millions de tonnes pour la campagne 2022-2023, soit environ 100 kg par habitant pour l'ensemble de la population mondiale. En volume de production, c'est la quatrième culture mondiale derrière la canne à sucre, le maïs et le riz. L'amélioration mondiale des techniques culturales et la sélection génétique ont conduit à un accroissement considérable des rendements moyens. Au cours des 30 dernières années, l'Amérique du Sud a connu des rendements stables de 20 q/ha, tandis que l'Afrique et le Proche-Orient ont atteint 10 q/ha (l'Égypte et l'Arabie Saoudite atteignant, en culture irriguée, 35 à 40 q/ha). En Europe, des rendements très élevés sont obtenus en culture intensive, avec 30 à 60 q/ha.

3.3. Aspect sur le matériel génétique de blé dur

La culture du blé dur (*Triticum turgidum* L. var. durum) en Algérie repose sur deux types de germoplasmes : (i) les génotypes locaux traditionnels, caractérisés par un faible potentiel de production, et (ii) les génotypes introduits récemment, sélectionnés pour leur haut potentiel de

production. Cependant, ce matériel introduit tend à disparaître plus rapidement, principalement en raison de son inadaptation aux conditions locales et de sa sensibilité à la sécheresse (Hazmoune, 2000). Les variétés de blé dur présentes en Algérie sont répertoriées dans le tableau ci-dessous.

Tableau I.5 : Liste quelques variétés de blé dur cultivées en Algérie (ITGC, 2017 ; Kirouani et al., 2019)

	Nom variétale	classification
Céréale ; Le blé dur	Bidi 17, Hedba 3, MBB 8037, O.Zenati 368 T Polo/ZB, Inrat 69, Chen's,	Génotypes introduits
	GTA dur, Bousselam, Simeto, Ofanto, Guemgoum, Cirta, Vitron, Waha	Génotypes locaux en culture traditionnelles

3.4. Importance de la culture de blé dur

La culture du blé dur présente de nombreux avantages, parmi lesquels on peut citer :

- **Facilité de culture** : Le blé dur ne nécessite ni aménagements spécifiques du champ ni un entretien intensif. Entre le labour, le semis et la moisson, les travaux à réaliser sont relativement réduits. De plus, après la récolte, il n'exige pas d'opération de décorticage.
- **Progrès agricoles** : La culture du blé dur s'est imposée en raison de sa facilité de culture, mais aussi parce que la majorité des progrès agricoles ont été expérimentés sur cette céréale.
- **Sélection variétale** : Différents types de blé sont sélectionnés en fonction de leur adaptation à la zone climatique et de leur rendement, ce qui en fait une culture adaptée à divers environnements.
- **Importance commerciale** : Selon les statistiques de la FAO, seules les variétés de blé dur et de blé tendre ont une grande importance commerciale à l'échelle mondiale, en raison de leur facilité de gestion et de leur adaptation à leur milieu.

III. Système d'association des cultures céréales légumineuses

En termes d'utilisation des terres, la culture en association s'avère plus productive que la culture séparée de deux espèces (Andrew et Kassam, 1976 ; Willey, 1979 ; Ofori et al., 1987). Cette pratique est courante dans de nombreuses régions d'Afrique, d'Asie et d'Amérique latine (Ofori et al., 1987). La culture intercalaire, l'un des systèmes agricoles multiples, est pratiquée par les agriculteurs depuis de nombreuses années sous diverses formes et dans la plupart des régions, jouant ainsi un rôle crucial (Zhang F. et Li L., 2003).

L'intérêt pour la culture intercalaire céréales-légumineuses s'est accru dans certaines régions tempérées au climat chaud, telles que l'Australie et les États-Unis. Cet intérêt s'explique par les avantages avérés ou présumés de ce type de système, comme des rendements en grains plus élevés, une meilleure efficacité d'utilisation des terres, et une amélioration de la fertilité des sols grâce à la fixation de l'azote par les légumineuses (Ofori et al., 1987).

Développer des systèmes de culture capables de maximiser les rendements tout en réduisant la dépendance aux engrais azotés semble être une approche prometteuse. La culture intercalaire légumineuses-céréales permet de promouvoir une agriculture économe en énergie et durable (AIEA, 1980 ; Ofori et al., 1987). Ce système est attractif en raison de ses nombreux avantages potentiels, tels que l'augmentation de la productivité, une meilleure utilisation des ressources et une plus grande fiabilité des rendements d'une saison à l'autre. Lorsque les légumineuses sont cultivées avec des céréales, la nutrition azotée de la culture associée peut être améliorée par le transfert direct d'azote de la légumineuse à la céréale (Giller et Wilson, 1991).

Les légumineuses, grâce à leur adaptabilité à différents modes de culture et à leur capacité à fixer l'azote, offrent de réelles opportunités pour augmenter la productivité des systèmes agricoles. Par conséquent, l'inclusion des légumineuses dans ces systèmes peut significativement améliorer les rendements (Banik et al., 2006). De plus, ces cultures intercalaires sont des sources potentielles de nutriments, tout en réduisant l'érosion des sols et en limitant la prolifération des mauvaises herbes (Exner et Cruse, 1993 ; Banik et al., 2006).

1. Rôle et avantages de la culture associée en intercalaire

La culture intercalaire céréales-légumineuses est considérée comme l'un des systèmes de culture les plus efficaces pour améliorer l'utilisation des nutriments tels que l'azote (N), le phosphore (P) et les micronutriments (Lambers et al., 2006 ; Betencourt et al., 2012). Ce système se définit comme la croissance simultanée de plusieurs espèces ou cultivars dans un même champ, durant une même période de croissance (Hauggaard-Nielsen et al., 2007). Plusieurs études ont démontré que la culture intercalaire légumineuses-céréales, comparée aux

systèmes monocultureaux, est plus efficiente en termes de croissance des plantes et offre des rendements plus stables grâce à la complémentarité interspécifique, la facilitation et la concurrence (Corre-Hellou et Crozat, 2005).

Lorsque les légumineuses sont associées à la culture du blé, elles apportent des avantages significatifs, notamment grâce à leur capacité à fixer l'azote atmosphérique et à enrichir le sol. En fonction des espèces et des conditions, elles peuvent couvrir entre 20 et 40 % des besoins en azote du blé, certaines variétés pouvant fixer jusqu'à 300 kg d'azote par hectare. L'alternance des légumineuses et du blé permet ainsi d'obtenir des rendements céréaliers plus élevés et une meilleure teneur en protéines. De plus, certaines légumineuses, comme les pois chiches, sécrètent des composés facilitant l'absorption du phosphore par les racines du blé, ce qui stimule le développement global de la plante.

En Afrique du Nord et en Asie de l'Ouest, la rotation du blé avec des légumineuses, notamment les pois chiches, les lentilles et les fèves, est de plus en plus courante dans les zones non irriguées, où les sols sont pauvres en azote. Ces légumineuses contribuent non seulement à diversifier la production, mais elles enrichissent également le sol par la fixation biologique de l'azote, optimisent l'utilisation des ressources en eau, et rompent les cycles des mauvaises herbes, des ravageurs et des agents pathogènes (FAO, 2023).

L'association céréales-légumineuses permet non seulement d'améliorer les rendements, mais aussi de maximiser la nutrition azotée (via la fixation symbiotique de N₂) et la disponibilité du phosphore (Li et al., 2005). La plupart des recherches sur les cultures intercalaires se concentrent sur les associations légumineuses-céréales, car ces systèmes sont à la fois productifs et durables, en utilisant efficacement les ressources (eau, lumière, nutriments) et en limitant les impacts négatifs sur l'environnement (Zhang et Li, 2003).

Par exemple, dans l'association blé (*Triticum aestivum* L.) et pois chiche (*Cicer arietinum* L.), les deux cultures cohabitent pendant environ 70 à 80 jours. Le pois chiche aide à améliorer l'absorption du phosphore sous forme de phytate-P par le blé associé. De plus, la culture intercalaire réduit la teneur en nitrate dans le sol en utilisant plus efficacement les nutriments que les systèmes monocultureaux (Zhang et Li, 2003).

2. Type d'association des cultures

L'association des cultures peut inclure diverses combinaisons, telles que des plantes annuelles avec des plantes annuelles, des plantes annuelles avec des plantes pérennes, ou encore des plantes pérennes avec des plantes pérennes (Ghanbari et Lee, 2003). Cette pratique est classée en quatre catégories principales (Eskandari, 2012) :

Cultures associées en sillon : Cette méthode consiste à cultiver simultanément deux ou plusieurs cultures en rangées régulières. Les cultures peuvent être plantées dans la même rangée ou en alternance avec une autre culture.

Cultures associées en vrac : Ici, plusieurs cultures sont semées ensemble sans suivre un ordre particulier. Cette approche est couramment utilisée pour associer des légumineuses à des cultures fourragères.

Cultures associées en bandes : Cette technique implique de cultiver différentes espèces en bandes suffisamment larges pour permettre une gestion séparée des cultures, tout en étant suffisamment proches pour favoriser des interactions bénéfiques entre elles.

Cultures associées en relais : Dans cette méthode, une seconde culture est introduite après que la première ait atteint le stade de floraison, mais avant qu'elle ne parvienne à maturité complète. Cela permet d'optimiser l'utilisation des ressources disponibles.



Figure I.3 : Semis associé de blé dur (2 rangs sur 3) et de féverole (1 rang sur 3) (Marguerie, 2019).

3. Partage des ressources entre les cultures associées

Dans les associations de cultures céréale-légumineuse, les espèces associées établissent des interactions positives (facilitation) ou négatives (compétition) pour exploiter les ressources du milieu (Hinsinger et al., 2012).

3.1. Facilitation

La facilitation est synonyme d'interaction positive par laquelle une espèce végétale augmente la croissance, la reproduction et/ou la survie d'une autre espèce végétale en modifiant les propriétés biotiques/abiotiques de l'environnement, ce qui entraîne une augmentation de la fraction de la ressource qui est accessible aux plantes (c'est-à-dire à la disponibilité des ressources) (Callaway, 1995). Elle correspond à une augmentation des performances d'un individu suite à l'accroissement de la disponibilité de la ressource induite par un autre individu suite à une modification de l'environnement. Cela peut se produire par:

- **Mécanismes directs positifs**, tels que l'altération favorable de la lumière, de la température, de l'humidité du sol, des nutriments du sol, etc.
- **Mécanismes indirects**, tels que les changements bénéfiques dans les sols mycorhizés ou les communautés microbiennes (Hauggaard-Nielsen et Jensen, 2005 ; Li et al., 2006 ; de Kroon, 2007).

Les **mécanismes directs positifs** : les exsudats des racines jouent un rôle majeur dans la biodisponibilité du P via plusieurs mécanismes : protons/hydroxyles et carboxylates solubilisent le P inorganique, tandis que les phosphatases racinaires hydrolysent le P inorganique (Hinsinger, 2001 ; Vance et al., 2003). La plupart des études sur les cultures associées céréales-légumineuses supposent que les céréales bénéficient le plus de leurs associations avec les légumineuses (facilitation à sens unique), parce que les légumineuses excrètent de plus grandes quantités de protons (Hinsinger et al., 2003), de carboxylates (Vance et al., 2003, Pearse et al., 2006) et de phosphatases (Nuruzzaman et al., 2006) dans leur rhizosphère. Mais les céréales peuvent aussi changer la disponibilité du P dans la rhizosphère, et on pourrait bien s'attendre à la facilitation de l'acquisition de P pour la légumineuse ou même à une facilitation à double sens dans les systèmes associés céréales-légumineuses. En culture en association, il est admis qu'il y a une absorption plus élevée du P qu'en culture pure. Cela peut être expliqué par une augmentation de l'exsudation d'acides organiques par les légumineuses, augmentant ainsi la disponibilité de P dans le sol, avec une facilitation de l'acquisition de ce P par les céréales (Hinsinger et al., 2011).

Les **mécanismes indirects** : les communautés microbiennes qui colonisent le sol ou la rhizosphère jouent un rôle important dans la croissance et le développement des plantes. Parmi ces communautés, les bactéries solubilisatrices de phosphore jouent un rôle fondamental dans le cycle biogéochimique du P en transformant le phosphore insoluble en forme soluble par l'acidification, la chélation, les réactions d'échanges et la formation de polymères de

substances. Ces microorganismes constituent deux groupes : ceux qui vivent à l'état libre, non loin des racines et souvent même sur la racine sans y être liés, et ceux qui vivent en symbiose avec les plantes (Leggett et al., 2001). Les microorganismes symbiotiques ont été largement étudiés et utilisés pour augmenter la production de plusieurs cultures.

En effet, plusieurs chercheurs ont prouvé le rôle essentiel du mécanisme de solubilisation du phosphate dans l'amélioration de la croissance des plantes. Par exemple, divers microorganismes du sol, y compris les bactéries et les champignons, améliorent la disponibilité du phosphore aux plantes (Lifshitz et al., 1987 ; Pankhurst et al., 1994). Le mécanisme commun utilisé par des microorganismes pour la solubilisation du phosphate tricalcique est l'acidification du milieu via la biosynthèse et la libération d'un large éventail d'acides organiques (Goldstein, 2007 ; Delvasto et al., 2008). Parmi les genres de bactéries qui ont présenté cette capacité, on trouve : *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Enterobacter* et *Rhizobium* (Rodriguez et Fraga, 1999 ; Gadagi et Tongmin, 2002).

3.2. Complémentarité

La complémentarité peut être définie comme une diminution de la concurrence et de l'exclusion concurrentielle par la répartition des ressources entre les espèces associées. Les espèces peuvent utiliser une ressource donnée différemment dans le temps, dans l'espace et dans la forme (Fridley, 2001).

Un exemple bien connu est la complémentarité de l'utilisation de l'azote (N) entre les céréales et les légumineuses fixatrices de N₂. Des transferts directs et indirects d'azote de la légumineuse à la graminée peuvent se combiner aux effets de niche pour améliorer la nutrition azotée et la croissance de la graminée (Jensen, 1996). Ces transferts proviennent essentiellement de la rhizodéposition azotée de la légumineuse, composée majoritairement d'exsudats de composés solubles (acides aminés, protéines, hormones excrétées par les racines) et du recyclage via le cycle de l'azote et la minéralisation par les microorganismes du sol, des racines et des nodosités sénescents (Wichern et al., 2008 ; Fustec et al., 2010).

3.3. Compétition

La compétition est le processus par lequel deux plantes ou populations de plantes interagissent de façon à ce qu'au moins l'une exerce un effet négatif sur l'autre (par exemple : prélèvement d'azote par une espèce, ce qui réduit la quantité d'azote disponible pour l'autre) (Vandermeer, 1989).

3.3.1. Compétition pour la lumière

Le partage de la lumière entre les espèces associées est un élément crucial du fonctionnement des associations en raison de l'implication de cette ressource dans de multiples processus (photosynthèse, transpiration, morphogenèse) (Sinoquet et al., 2000). La lumière est une ressource qui doit être captée et utilisée instantanément par la plante, au risque d'être définitivement perdue. Trois éléments principaux sont déterminants pour le partage de la lumière entre les espèces associées : la hauteur relative de ces espèces, leur surface foliaire et la capacité de cette surface à intercepter les rayonnements (Louarn et al., 2010).

La compétition implique que l'interception du rayonnement par l'espèce dominante a un impact direct sur la quantité et la qualité de la lumière interceptée par l'espèce dominée. Dans les couverts multi-spécifiques, les espèces associées peuvent être complémentaires pour l'interception de la lumière grâce à leur architecture. La réduction de la quantité de lumière reçue par l'espèce dominée peut avoir des effets négatifs sur sa croissance (Caldwell et Hansen, 1993), mais cela peut être au bénéfice de l'espèce dominante et de la production de l'ensemble du couvert (Harris et al., 1987).

3.3.2. Compétition pour les éléments minéraux

Les associations de cultures comprenant des légumineuses utilisent à la fois l'azote minéral présent dans le sol et celui présent dans l'atmosphère grâce à la capacité des légumineuses à fixer l'azote de l'air. Plusieurs auteurs ont montré, dans le cadre des associations céréale-légumineuse, que la compétition racinaire pour l'azote minéral exercée par la céréale augmentait significativement la part de la fixation symbiotique dans la quantité d'azote accumulée chez la légumineuse, par rapport à lorsqu'elle est cultivée seule (Hauggaard-Nielsen et al., 2009 ; Bedoussac et Justes, 2010 ; Naudin et al., 2010). Les graminées apparaissent plus compétitives pour l'azote minéral, le phosphore et le potassium que les légumineuses (Haynes, 1980 ; Davies, 2001).

3.3.3. Compétition pour l'eau

La compétition pour l'eau est également importante et étroitement liée au partage de la lumière, via son implication dans les processus de transpiration (Louarn et al., 2010). La capacité de chacune des espèces associées à acquérir l'eau du sol est davantage influencée par leur vitesse d'enracinement, leur distribution racinaire ainsi que la durée de vie des racines, que par la capacité physiologique des racines à extraire l'eau (Ozier-Lafontaine et al., 1998). Ces caractères, qui contrôlent la morphologie et la plasticité du système racinaire, sont reconnus pour avoir une plus grande importance que les capacités physiologiques des racines à extraire l'eau dans la compétition pour cette ressource (Jackson et al., 2000).

4. Processus d'acquisition des nutriments en association céréale-légumineuse

4.1. Diversité des traits racinaires et acquisition d'un nutriment entre espèces

Il est proposé que l'amélioration de la valorisation d'un nutriment du sol par les espèces en association soit liée à une augmentation du volume de sol exploré et exploité par les espèces en comparaison de leurs cultures monospécifiques. La diversité des traits racinaires pourrait permettre de diminuer l'intensité de la compétition entre espèces en :

- Diminuant l'intensité des interactions liées au degré de recouvrement des rhizosphères (séparation de niche d'un point de vue spatial) et/ou
- Augmentant la disponibilité d'un nutriment (facilitation). La géométrie de la rhizosphère d'une espèce est déterminée par des traits relatifs à l'occupation de l'espace par les racines et à leur fonctionnement biologique (processus rhizosphériques). La majorité des études, considérant que l'acquisition d'un nutriment est uniquement déterminée par le prélèvement, ont été amenées à proposer trois types de différenciation. L'amélioration de l'acquisition des nutriments serait ainsi liée à la diversité des traits racinaires permettant la différenciation dans le temps, dans l'espace et selon les « formes » prélevées du nutriment considéré (Von Felten et al., 2009).

4.2. Production des poils racinaires

De faibles valeurs de disponibilité de certains nutriments sont reconnues pour induire le développement de poils racinaires (López-Bucio et al., 2003) ainsi que de racines spécialisées comme les « cluster roots » (Lamont, 2003), aboutissant à une augmentation de la surface racinaire. La production de poils racinaires est reconnue pour être très sensible à la disponibilité en P, mais aussi d'autres nutriments. Les « cluster roots » ou racines protéoïdes correspondent à un assemblage dense de racines latérales de même longueur et relativement courtes. La formation de ces organes est reconnue pour être stimulée majoritairement par de faibles valeurs de P et également évoquée dans le cas du Fe (Hagström et al., 2001).

IV. Le phosphore

Le phosphore (P) est un élément largement distribué dans la nature. Il est considéré, avec l'azote (N) et le potassium (K), comme un constituant fondamental de la vie des plantes et des animaux. Les concentrations des tissus végétaux en phosphore varient entre 0,1 et 0,5 %, soit près du dixième des teneurs en azote et en potassium (1 à 6 %). À la différence du nitrate et du sulfate, le phosphore n'est pas réduit dans les plantes mais reste sous sa forme oxydée la plus élevée (Zapata et Roy, 2004 ; Alkama, 2010). Le phosphore, à l'instar de l'azote et du potassium, est un élément essentiel pour le règne végétal. Il joue un rôle primordial dans la croissance, le développement, ainsi que dans le métabolisme des plantes et le transport de l'énergie (Ouedraogo et al., 2015).

Le phosphore est présent dans les sols à la fois sous forme organique et minérale. C'est un nutriment important qui améliore la récolte et la production (Raghothama, 1999 ; Vance, 2001 ; Latati, 2014). Cependant, le P est présent en tant que ressource finie dans la lithosphère (0,1 %) et varie avec le type de sol et le système agricole (Thompson et Troeh, 1973). L'apport de P via des engrais minéraux a été pratiqué pour améliorer le rendement des agroécosystèmes (Dawson et Hilton, 2011), mais la disponibilité des engrais en P est de plus en plus limitée par l'appauvrissement des réserves de minéraux (Dyson, 1999).

Le P est un élément nutritif majeur pour les plantes, mais sa disponibilité dans les sols est généralement faible (Arora et Gaur, 1978 ; Chabot et al., 1993 ; Drevon, 2018), ce qui limite par la suite le rendement des récoltes, plus particulièrement pour les légumineuses, dont la croissance dépend de la fixation symbiotique de N₂ (FSN) (Drevon, 2018).

C'est pour cette raison que l'ajout d'engrais phosphatés est devenu une pratique courante en agriculture moderne. Cependant, il est bien connu qu'une forte proportion des phosphates solubles ajoutés aux sols est insolubilisée par le fer et l'aluminium en sols acides, et par le calcium en sols calcaires (Chang et Chu, 1961 ; Gachon, 1973 ; Chabot, 1993).

1. La biodisponibilité du phosphore à l'interface sol-plante

Le phosphore est un élément reconnu comme étant indispensable à toute vie végétale. Il participe étroitement à la plupart des activités biochimiques complexes à l'intérieur de la plante (respiration, synthèse et dégradation des glucides, des protéines, etc.). L'approvisionnement en cet élément dépend de la nature des diverses sources de phosphore présentes dans le sol et des actions des constituants minéraux et organiques du sol sur la mobilité des ions phosphatés.

1.1. Le phosphore dans le sol

Le phosphore, à l'instar de l'azote et du potassium, est un élément essentiel pour le règne végétal. Il joue un rôle primordial dans la croissance et le développement, ainsi que dans le métabolisme des plantes et le transport de l'énergie. Or, les sols de l'Afrique en général sont carencés en phosphore (Lompo et al., 2009). Cette déficience en phosphore des sols est une contrainte majeure à l'intensification de la productivité des sols (Ouedraogo et al., 2015). Pour corriger cette déficience en éléments nutritifs en général, et en phosphore en particulier, plusieurs modes de gestion de la fertilité combinant l'usage de la matière organique et des engrais minéraux ou du phosphate naturel ont alors été adoptés (Ouedraogo et al., 2005 ; Lompo, 2009 ; Ouedraogo et al., 2015). Toutefois, les rendements des cultures restent faibles. Ainsi, face à la baisse continue de la fertilité des sols, de la productivité des cultures, à la raréfaction des terres et à l'augmentation du prix des facteurs de production, l'Afrique doit concevoir une agriculture plus productive et plus durable. Par conséquent, l'intensification des systèmes de culture constitue une alternative pour améliorer durablement les rendements (Doré et al., 2011 ; Ouedraogo et al., 2015). Un sol agricole contient une à trois tonnes de P par hectare dans les 20 premiers centimètres de son profil. Cette quantité dépasse largement les besoins annuels d'une culture, qui sont de l'ordre de quelques dizaines de kilogrammes par hectare (Frossard et al., 2004). En fait, seuls quelques kilogrammes de P par hectare sont présents dans la solution du sol sous forme d'orthophosphate et donc instantanément disponibles pour la culture. Les phosphates sont pour la plupart localisés dans la phase solide du sol, où ils sont associés à des cations, des oxydes et hydroxydes métalliques, des argiles, du carbone, ou à l'intérieur d'organismes morts ou vivants. Ces formes de P présentent différents niveaux de disponibilité pour les plantes. Certaines formes peuvent se retrouver très rapidement dans la solution du sol, alors que d'autres migrent très lentement de la phase solide vers la solution du sol, et certaines ne seront libérées que grâce à l'activité d'organismes vivants (minéralisation, solubilisation) (Bargaz, 2012).

Selon Tiessen (2008), plus de 99 % du phosphore naturel se trouve sous forme minérale et organique. Avec quatre atomes d'oxygène liés au phosphore, la molécule d'acide phosphorique a une densité de charge négative élevée, ainsi elle peut aisément se lier à n'importe quel cation ou surface chargée positivement, ce qui limite considérablement la mobilité du phosphore dans le sol. Lorsque le phosphore est lié à de grandes molécules organiques, sa charge est légèrement masquée. En conséquence, les formes organiques du phosphore sont souvent plus mobiles dans le sol que les formes inorganiques.

Selon Hinsinger et al. (2001) et Richardson et al. (2009), une situation d'augmentation de la disponibilité en P du sol, souvent limitée par l'adsorption sur les surfaces des phases minérales et la fixation aux cations (Ca^{2+} , Al^{3+} ou Fe^{2+}) dans les sols acides et alcalins, reste à optimiser. Par conséquent, adopter des technologies durables pour mieux exploiter les ressources en éléments nutritifs du sol tels que le P est un défi de recherche intéressant à résoudre. Les formes du phosphore dans le sol sont multiples et variées, et celles-ci évoluent rapidement sous diverses influences telles que les alternances humectation-dessiccation, l'acidité, la basicité et l'alcalinité, ainsi que l'activité biologique.

1.1.1. Le phosphore minéral

Tang et al. (2001) ont montré que les ions orthophosphate ou P_i constituent la seule forme de P directement assimilable par les plantes. Seule une faible proportion de P est présente sous forme de P_i en solution et sa concentration dans la majorité des sols ne dépasse pas 0,1 mM. Le phosphore minéral est un P inclus dans des minéraux comme les apatites et dans tous les composés d'oxyhydroxydes de fer et d'aluminium, ainsi que dans les phosphates tricalciques associés à un calcaire actif, franchement insolubles dans les milieux calcaires. Ceci est vrai aussi bien dans les sols calcaires, où le phosphore est complexé par le carbonate de calcium (Ca-P) (Libaga et al., 2004) et de magnésium (Mg-P) (Alkama, 2010), que dans les sols acides, où le phosphore est alors complexé par les hydroxydes de fer et d'aluminium. Ainsi, la zone d'épuisement de phosphore autour des racines se limite généralement à moins de 1 mm autour des racines (Hinsinger, 2004 ; Alkama, 2010).

Concernant la dynamique de la dissolution des minéraux phosphatés, deux grands types de réactions physico-chimiques ont été mis en évidence : les réactions de précipitation/dissolution et les réactions d'adsorption/désorption. La précipitation de P_i avec un cation est observée lorsque les concentrations en P_i et en cation sont suffisamment élevées. En effet, la fraction minérale de P du sol se trouve dans différentes combinaisons avec le Fe^{3+} , l' Al^{3+} , le Ca^{2+} , le fluor et d'autres éléments. Ainsi, la plus grande partie du P ajouté sous forme soluble est soit adsorbée par le calcium présent sur le complexe d'échange, soit précipitée par les formes libres de fer ou d'aluminium, qui se retrouvent en quantités importantes dans les sols, de l'ordre de 0,2 à 0,7 %, soit plusieurs tonnes par hectare (Frossard et al., 2004).

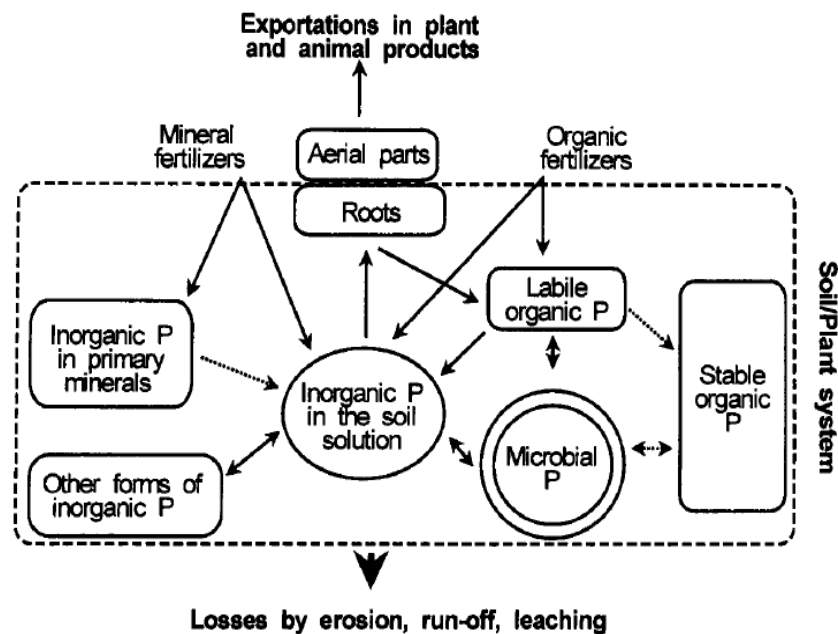


Figure I.4 : le cycle du phosphore dans le sol (adapté par Frossard, 2000).

1.1.2. Le phosphore organique

Le P organique est l'ensemble des composés comportant un ou plusieurs groupements phosphatés, produits par le métabolisme des êtres vivants. De ce fait, il dérive principalement des résidus végétaux, des cellules microbiennes et fongiques, ainsi que des métabolites cellulaires (Bargaz, 2012). La minéralisation et l'immobilisation des composés organiques phosphatés sont des processus qui font partie du cycle du phosphore dans les sols, lesquels contiennent des quantités significatives de matière organique (Frossard et al., 2004). Selon Condron et Tiessen (2005), le P organique peut représenter jusqu'à 80 % du P total présent dans un sol. Il est essentiellement présent sous forme de phosphates d'inositol (phytate) et, secondairement, sous forme d'acide phytique (phytine), un phosphate de sucre libéré par la décomposition des résidus des plantes par les microorganismes, d'acides nucléiques et de phospholipides (Bargaz, 2012). Les différentes formes du P organique peuvent être classées selon le nombre de liaisons ester reliant le groupement P et le C. Une seule liaison définit les phosphates monoesters $R-O-PO_3H_2$ et deux liaisons les phosphates diesters $R-O-(PO_2H)-OR'$. On distingue également le groupe des phosphoanhydrides organiques caractérisés par la liaison P-O-P, comme l'ADP, l'ATP et les polyphosphates (Bargaz, 2012).

La présence d'un ou plusieurs groupements phosphate dans les composés du P organique entraîne une faible mobilité dans la solution du sol. En effet, ils peuvent être fortement adsorbés par les minéraux argileux et peuvent former avec la matière organique des composés difficilement dégradables ou précipiter avec les oxydes de Fe ou d'Al dans les sols acides, ou

avec le Ca et le Mg dans les sols alcalins. Le taux d'adsorption du P organique dans les sols dépend de sa structure, notamment du nombre de résidus P, de sa charge, mais aussi de sa taille moléculaire (Louche, 2009 ; Bargaz, 2012). Ainsi, les phosphates d'inositol s'adsorbent plus facilement à la surface des argiles que les acides nucléiques, les phospholipides ou les sucres simples. La difficulté d'accès aux formes du P organique en interaction avec les argiles et la matière organique du sol implique qu'une grande proportion du P organique du sol reste encore chimiquement non déterminée.

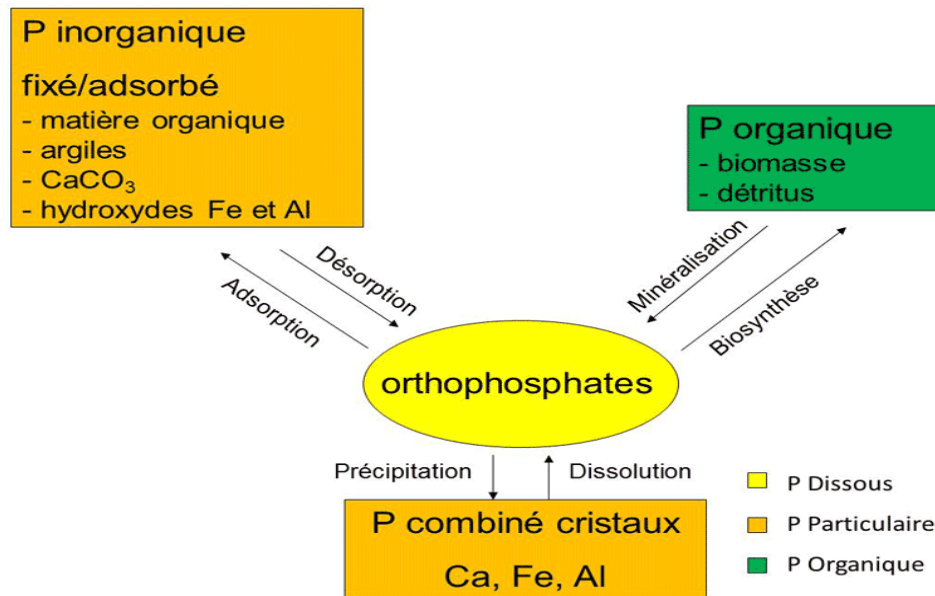


Figure I.5 : Les formes du Phosphore et leurs interactions (Nemery, 2018)

1.2. Le phosphore dans la plante

Le phosphore est absorbé par les racines principalement sous forme d'orthophosphate H_2PO_4^- et, dans une moindre mesure, sous forme de HPO_4^{2-} . Ce prélèvement est un processus actif, facilité par le co-transporteur H^+ (Ullrich Eberius et al., 1981 ; Tanner et Caspari, 1996 ; cités par Mengel et Kirby, 2001). Une fois absorbé par les plantes, le phosphore est rapidement impliqué dans le métabolisme. En effet, après au moins 10 minutes après l'absorption, 80 % du phosphore absorbé est déjà incorporé dans les composants organiques. Toutefois, juste après, il est transformé sous forme de phosphore inorganique dans le xylème (Marschner, 1998).

Les plantes en croissance stockent peu d'ions phosphatés simples, contrairement aux graines. Ce stockage assure un bon démarrage de la croissance et du développement des graines en germination, avant l'installation du système racinaire. Dans les graines, le phosphore est principalement stocké sous forme de polyphosphates, tels que les phytates. Ces phytates constituent environ 50 % du phosphore total contenu dans les graines des légumineuses et

environ 60 à 70 % dans les graines de céréales. Dans les graines en germination, le phosphore est libéré par l'enzyme phytase pour être incorporé dans d'autres molécules (Johnson, 2000). Dans une expérimentation sur fève, menée en champ sur trois années, Kupka et al. (1989) ont observé que, jusqu'au stade de formation des gousses, la majeure partie du phosphore se trouve dans les organes végétatifs. Au cours de la maturation, les teneurs en azote et en phosphore dans les graines augmentent progressivement. Le maximum de prélèvement en phosphore a lieu à partir de 110 jours après le semis.

2. Le prélèvement du phosphore par la plante

Les légumineuses, en général, ont des besoins élevés en phosphore, mais leur capacité à prélever cet élément du sol est souvent moins efficace que celle des céréales. Le système racinaire des légumineuses est généralement moins développé comparé à celui des graminées, ce qui limite l'absorption du phosphore, dont la diffusion vers la rhizosphère à travers la solution du sol est très lente. Une carence en phosphore chez les légumineuses n'affecte pas seulement l'établissement de la culture et sa croissance, mais également la nodulation et la fixation biologique de l'azote (Tang et al., 2001).

3. La déficience en phosphore est une contrainte primaire à la productivité des plantes

L'infertilité des sols est la principale contrainte à la productivité des plantes, dont la faible disponibilité du phosphore dans le sol est causée par plusieurs facteurs, y compris la réactivité de l'orthophosphate avec les constituants du sol courants tels que les oxydes de Fe et Al, entraînant des composés de biodisponibilité limitée, d'autant plus que l'altération du sol progresse et que le cycle du phosphore est ouvert et tend à l'épuisement (Lynch et Brown, 2005). L'activité humaine dans de nombreux écosystèmes gérés a encore réduit la biodisponibilité du phosphore par l'érosion de la couche arable, l'acidification et l'extraction de nutriments, en particulier dans les pays en développement. Environ 40 % des terres agricoles du monde ont été considérablement dégradées par l'activité humaine, y compris 65 % des sols d'Afrique. Dans de nombreux pays en développement, en particulier en Afrique, l'utilisation des engrais est négligeable, et la productivité de bon nombre de ces agroécosystèmes est limitée en phosphore. La réponse des écosystèmes terrestres au changement climatique mondial dépendra des interactions de variables du changement climatique avec des limitations édaphiques à la productivité des plantes, y compris le phosphore (Lynch et Brown, 2005). L'adaptation des plantes à une faible disponibilité en phosphore est donc d'un intérêt considérable pour la biologie végétale fondamentale et appliquée. Cette contrainte abiotique constitue, à l'échelle mondiale, un handicap pour le développement et l'amélioration des

rendements. L'ampleur de cette déficience peut être multipliée en présence d'autres éléments minéraux (Al, Fe et Ca) qui le complexent et le rendent moins disponible pour être absorbé par la plante (Shen et al., 2001). Plusieurs autres contraintes sont présentes dans les sols et nuisent au développement de l'agriculture. Parmi elles, les toxicités aluminique et manganique, qui sont la deuxième cause après la faible disponibilité des sols en P. D'autres éléments (Ca, K, Mg) peuvent contribuer, en cas de carence, à accentuer la pauvreté des sols cultivés (Bargaz, 2012). Le phosphore étant très peu présent dans le sol, les plantes ont développé plusieurs stratégies pour le rendre biodisponible :

1. Elles peuvent stocker le phosphore dans les racines lors des périodes d'abondance pour ensuite le redistribuer dans les parties aériennes lors des périodes de déficience.
2. Elles augmentent leurs taux d'endomycorhization.
3. Elles développent leur biomasse racinaire, certaines même produisant des racines spéciales appelées protéides.
4. Elles peuvent excréter davantage d'acides organiques et d'enzymes.
5. Elles acidifient le milieu par excrétion de protons H⁺ (Tang et al., 2004 ; Alkama, 2010). Cette stratégie s'avère très intéressante dans les sols calcaires où le pH de la rhizosphère peut être différent d'une ou deux unités de pH par rapport aux sols non rhizosphériques (Hinsinger et al., 2003 ; Alkama, 2010).

4. Le prélèvement du phosphore par la plante et la nutrition phosphatée

L'étude de la dynamique du prélèvement du phosphore dans les systèmes sol-plante révèle plusieurs points clés, dont le fait que le phosphore est absorbé par les racines des plantes uniquement sous forme d'ions orthophosphates (PO₄³⁻), comme le montre la figure I.5. De plus, les quantités de phosphore dissous dans la solution du sol sont très faibles. À mesure que les racines l'absorbent, il est remplacé par le phosphore provenant des réserves du sol, bien que ces échanges soient très lents.

La fertilisation phosphatée vise principalement à compenser les pertes de phosphore du sol après chaque récolte et à maintenir un niveau nutritionnel suffisant pour répondre aux besoins des cultures. Des études ont montré que, dans l'année même de l'apport, seulement jusqu'à 20 % de l'engrais phosphaté est directement utilisé par la plante. Le reste est stocké sous différentes

formes dans le sol et devient disponible au cours des années suivantes.

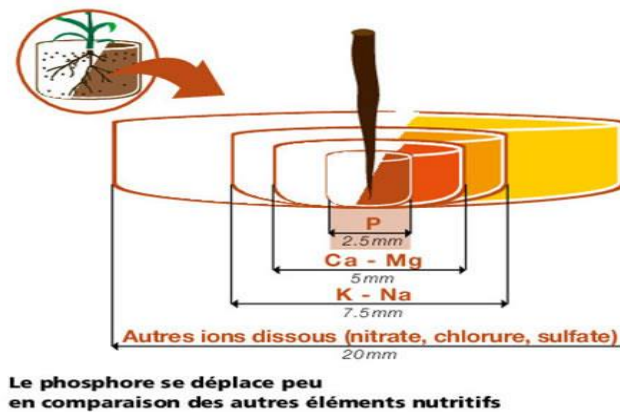


Figure I.6 : Déplacement par diffusion du phosphore vers la plante (Beaulieu et Lizotte, 2018).

5. Effet de la déficience en phosphore sur les légumineuses alimentaires

La carence en phosphore (P) est l'un des problèmes agronomiques les plus souvent rencontrés dans les sols riches en oxydes de fer et d'aluminium, qui occupent des surfaces très importantes dans la zone intertropicale. Les oxydes et hydroxydes de fer et d'aluminium sont en effet les constituants qui influencent le plus la fixation des ions phosphates dans les sols (Sifi et Drevon, 2003). Le phosphore est également un ingrédient essentiel pour les bactéries Rhizobium, qui convertissent l'azote atmosphérique (N_2) en une forme utilisable par les plantes, l'ammonium (NH_4^+). La déficience nutritionnelle liée à la pauvreté du sol en phosphore est le facteur limitant majeur de la fixation symbiotique de l'azote et de la productivité des légumineuses. La carence en phosphore affecte aussi la multiplication des rhizobia dans la rhizosphère, ce qui réduit la probabilité d'infection, ainsi que la croissance des nodosités (Sifi et Drevon, 2003).

6. Effet de l'association des cultures légumineuses céréales sur la déficience en phosphore

Les plantes interagissent avec les micro-organismes du sol de manière complexe, modifiant considérablement l'environnement rhizosphérique. Cette région, fortement influencée par les plantes, constitue le fondement du concept de « biodisponibilité » (Harmsen, 2007). La biodisponibilité du phosphore dans le sol peut varier de manière significative en fonction des espèces végétales, car chaque espèce a des capacités différentes pour influencer directement ou indirectement la disponibilité du phosphore inorganique (P_i) via les organismes présents dans la rhizosphère.

Les légumineuses, en particulier, jouent un rôle crucial dans ce processus. Ces plantes, qui dépendent souvent de la fixation biologique de l'azote, peuvent augmenter la concentration de

phosphore et d'azote dans la rhizosphère des cultures de céréales lorsqu'elles sont cultivées ensemble. Ce phénomène s'explique par plusieurs mécanismes :

- **Acidification de la rhizosphère** : Les racines des légumineuses libèrent des protons (H^+) dans le sol, ce qui abaisse le pH local et peut augmenter la solubilité du phosphore, le rendant plus accessible aux autres plantes.
- **Production d'acides organiques** : Les légumineuses sécrètent des acides organiques, tels que les acides citrique et malique, qui peuvent chélater le phosphore et d'autres nutriments, facilitant leur absorption.
- **Libération de phosphatases** : Les racines des légumineuses peuvent produire des enzymes phosphatases, qui hydrolysent les composés organiques contenant du phosphore, libérant ainsi du phosphore inorganique utilisable par les plantes.

Ces interactions bénéfiques entre les légumineuses et les cultures de céréales peuvent améliorer l'efficacité de l'utilisation des nutriments dans les systèmes de culture associés. Les légumineuses, en acidifiant la rhizosphère, favorisent la libération de phosphore des complexes du sol, augmentant ainsi la quantité de phosphore disponible pour les plantes voisines. De plus, la fixation de l'azote par les légumineuses enrichit le sol en azote, profitant aux cultures de céréales qui en dépendent.

En résumé, la capacité des légumineuses à modifier leur environnement racinaire et à interagir positivement avec les micro-organismes du sol joue un rôle essentiel dans l'amélioration de la biodisponibilité du phosphore et de l'azote pour les cultures associées. Ces mécanismes, tels que l'acidification de la rhizosphère, la sécrétion d'acides organiques et la production de phosphatases, illustrent l'importance des interactions plante-micro-organisme dans les écosystèmes agricoles (Betencourt et al., 2012 ; Li et al., 2014).

Objectifs de recherche :

Problématique

Les légumineuses alimentaires jouent un rôle très important dans l'alimentation humaine, surtout dans le bassin méditerranéen, et présentent plusieurs intérêts, dont les plus importants sont l'autosuffisance en protéines et la diversification des systèmes de production céréaliers. De nombreuses espèces de cette famille, comme le haricot, le petit pois, la fève, le pois chiche, etc., ont la capacité de croître dans des sols peu fertiles et pauvres en éléments nutritifs. Cela est dû à leur capacité à fixer l'azote atmosphérique grâce aux rhizobiums présents dans leurs nodosités. Cette capacité symbiotique permet de fournir une quantité d'azote importante, équivalente à celle apportée par les engrais chimiques.

La déficience en phosphore est un facteur limitant la production des cultures céréalières et légumineuses, en particulier dans les sols des zones méditerranéennes et tropicales, notamment en Algérie. Cependant, grâce à la fixation symbiotique de l'azote par les légumineuses, ces cultures offrent une quantité d'azote suffisante pour garantir un bon rendement, non seulement pour la culture en cours, mais aussi pour les cultures suivantes ou en association. De nombreuses études ont été menées avec succès sur l'effet des légumineuses sur le rendement des céréales semées en association sous diverses contraintes abiotiques. Dans ce contexte, des génotypes de pois chiche ont d'abord été multipliés sous déficience en phosphore, puis mis en association avec une céréale-le blé dur-. Des études ont montré que plusieurs génotypes de pois chiche répondent à la déficience en phosphore, cette réponse ayant pour conséquence d'augmenter la capacité de la plante à mobiliser les éléments minéraux présents dans le sol, en particulier le phosphore, constituant ainsi une bonne adaptation à la carence en P. Cela nous amène à conclure que les légumineuses pourraient jouer un rôle important dans la biodisponibilité du phosphore dans les sols (Alkama, 2010).

Objectifs

Les génotypes de pois chiches locaux voire Flip 90-13C. Flip 01-29C. Flip 93-93C. Flip 84-92C. Flip 97-677C. Flip 85-88C. ILC 32-79 ont un pouvoir de fixation symbiotique d'azote (FSN) et d'efficacité d'utilisation de phosphore (EUP) ont été utilisé dans le cadre de projet de recherche CROSYMED, financé dans le cadre de l'appel conjoint ARIMNet2 2017 par l'agence de financement FNRSDT/DGRSDT, Algérie. En étudiant l'adaptation des génotypes à la déficience en phosphore et aussi l'amélioration de rendement de culture légumière et céréalière misent en association.

Les objectifs de cette étude sont les suivants :

- a) Étudier les performances phénotypiques des génotypes locaux de pois chiche et leur adaptation à la déficience en phosphore, en analysant leurs capacités de fixation de l'azote atmosphérique (FSN), leur efficacité d'utilisation de la symbiose rhizobienne (EUSR) et leur efficacité d'utilisation du phosphore du sol (EUP).
- b) Étudier l'association céréales-légumineuses (blé dur-pois chiche) en évaluant et comparant l'adaptation des génotypes mis en association face à cette déficience, ainsi que l'amélioration du rendement des deux cultures intercalées.
- c) Évaluer le degré de compétition entre les deux cultures en association par l'étude de la ration équivalente (LER) et de la ration de compétition (CR) entre le blé dur et le pois chiche, afin de sélectionner les meilleurs génotypes pour un programme d'association céréale-légumineuse.

Les résultats attendus sont :

Cette recherche contribuera à une meilleure compréhension des mécanismes de nutrition des plantes, menant à des pratiques agricoles plus durables et à une augmentation de la productivité des cultures. L'intégration approfondie des processus de nutrition minérale et symbiotique dans la rhizosphère permettra de mieux comprendre le mécanisme de développement des cultures en association avec les légumineuses fixatrices d'azote.

Les recherches seront menées en plein champ, sur des sols peu fertiles en phosphore en Algérie, au cours d'une saison de multiplication et de deux saisons d'association, en comparant des sols à faible disponibilité en phosphore avec d'autres peu fertiles. Des observations en plein champ seront réalisées en Algérie dans les régions de Ain Defla et Tissemsilt, avec des géotypes locaux de pois chiche cultivés en Algérie. Dans la région de Ain Defla, l'étude est basée sur la multiplication des géotypes de pois chiche cultivés en monoculture sous déficience en phosphore. Des analyses physico-chimiques du sol ont été réalisées avant l'installation de l'essai en 2017, avec un suivi de la nodulation, de l'efficacité d'utilisation de la symbiose rhizobienne (EUSR) et de l'efficacité d'utilisation du phosphore (EUP) au moment de la floraison. Cette description quantitative de la nodulation est particulièrement importante et sensible à la déficience en phosphore (Vadez et al., 2001). Des analyses de l'azote et du phosphore dans les parties aériennes de la plante ont également été effectuées. Le rendement des géotypes a été calculé à partir de ces composantes lors de la maturité et de la récolte.

Dans la région de Tissemsilt, un test multilocal a été établi avec pour objectif d'évaluer l'effet de la déficience en phosphore sur les cultures associées. Deux sites expérimentaux différents ont été choisis, en fonction de leurs analyses physico-chimiques des sols : l'un déficitaire en phosphore et l'autre pourvu de cet élément essentiel. Les géotypes de pois chiche précédemment cultivés et multipliés à Ain Defla ont fait l'objet d'essais agronomiques durant deux saisons différentes (2018-2019).

Afin d'évaluer l'expression du potentiel des légumineuses dans les systèmes céréaliers sous déficience en phosphore, les géotypes de pois chiche ont été semés en monoculture et en association avec le blé dur, en comparant les résultats sous suffisance et déficience en phosphore, et en étudiant le degré d'adaptation de ces cultures associées à cette déficience. La nodulation, l'EUSR, l'EUP et l'EAP ont été mesurés au moment de la floraison, tandis que la biomasse aérienne et racinaire du blé dur associé a également été étudiée à la floraison. Ce stade physiologique est important pour un développement maximal des nodules et constitue un moment clé pour la fixation symbiotique de l'azote et l'assimilation du phosphore du sol. Des

analyses du sol rhizosphérique ont également été effectuées à la floraison. Les paramètres de rendement des deux cultures, associées et en monoculture, ont été mesurés lors de la récolte.

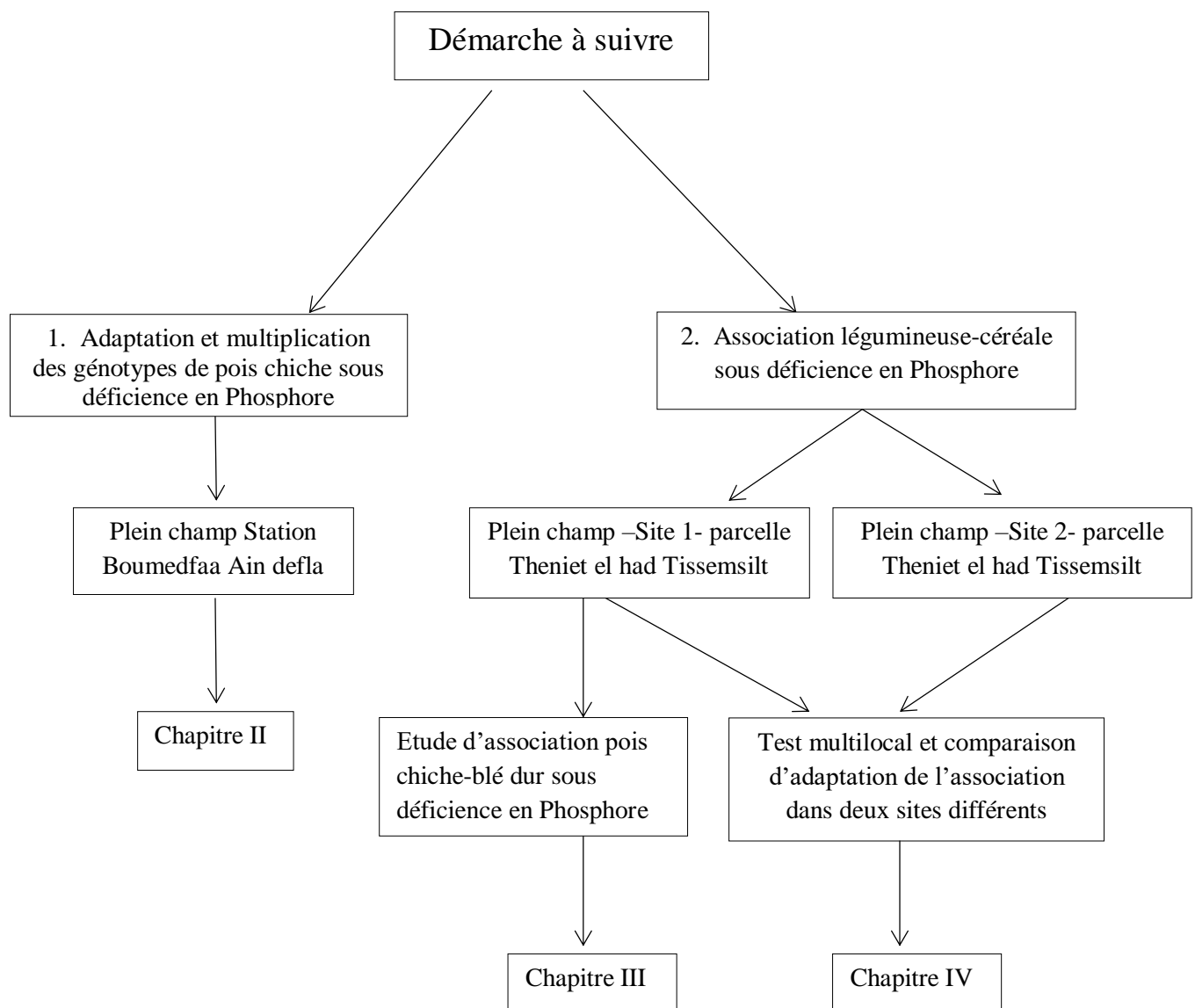


Figure I.7 : Plan de la thèse. Les résultats obtenus feront l'objet des chapitres II, III et IV dont le chapitre I réservé à la bibliographie

*Croissance, nodulation et rendement des géotypes de pois
chiche (Cicer arietinum L.) dans les sols à faible
disponibilité de P en Algérie, Cas de la wilaya d'Ain Defla*

Chapitre II

Croissance, nodulation et rendement des géotypes de pois chiche (*Cicer arietinum L.*) dans les sols à faible disponibilité de P en Algérie, Cas de la wilaya d'Ain Defla

1. Introduction

L'infertilité des sols est la principale contrainte de la productivité des plantes dans la majorité des surfaces agricoles. L'azote est souvent limitant dans les jeunes sols des régions tempérées, tandis que la faible disponibilité du phosphore dans le sol est causée par plusieurs facteurs, y compris la réactivité de l'orthophosphate avec les constituants du sol courants tels que les oxydes de Fe^{2+} et Al^{3+} , entraînant des composés de biodisponibilité limitée. Plus l'altération du sol progresse, plus le cycle du phosphore s'ouvre et tend à l'épuisement (Ofori et Stern, 1987), ce qui oblige à utiliser des technologies durables d'exploitation par adsorption et mobilisation du phosphore sur les surfaces minérales, ainsi que par fixation des cations de fer et d'aluminium (Richardson et al., 2009). En outre, l'apport de P par les fertilisants minéraux est souvent pratiqué afin de restaurer la fertilité des sols déficients en P (Dawson et Hilton, 2011), mais la disponibilité des engrais phosphatés est de plus en plus limitée à cause de l'épuisement des réserves naturelles de P et de l'accroissement des besoins en agriculture (Dyson, 1999).

Ainsi, la culture des légumineuses occupe une place primordiale au niveau des agrosystèmes, vu leurs intérêts agronomiques, économiques et nutritionnels qu'elles apportent via leur symbiose avec les rhizobiums (Faghire et al., 2011 ; Farissi et al., 2013, 2014). Ces derniers jouent un rôle important par l'activité de fixation d'azote atmosphérique (FSN), dans le maintien de la productivité des cultures et l'amélioration de la fertilité des sols, notamment les sols à faible rendement (Serraj et al., 2004). Ces espèces interviennent également dans le contrôle des insectes nuisibles, des maladies et des mauvaises herbes lorsqu'elles sont utilisées en assolement. Cependant, cette culture est particulièrement entravée sous déficience en P (Graham et al., 2003), affectant des surfaces agricoles importantes, atteignant 40 % des terres cultivables mondiales (Vance, 2001 ; Bargaz, 2012). Bien qu'il soit reconnu que cette contrainte affecte particulièrement la FSN, elle limite également la croissance et la survie des rhizobiums, la formation et le fonctionnement des nodosités, ainsi que la croissance de la plante hôte (Tang et al., 2001).

Dans ce sens, des recherches visant à optimiser la FSN chez différentes espèces de légumineuses ont été entreprises par de nombreux chercheurs (Vadez et al., 1999 ; Alkama et

al., 2009 ; Richardson et al., 2009 ; Bargaz et al., 2012 ; Lazali et al., 2013). En effet, la connaissance des aptitudes des légumineuses dans l'utilisation des nutriments sous déficience en P permettrait de mieux adapter ces plantes aux systèmes de culture paysans, afin d'améliorer la productivité et de préserver l'environnement.

Dans ce chapitre, l'étude du comportement des génotypes contrastants de pois chiche a été mise en place dans des sols déficitaires en phosphore. Cette approche est basée sur des essais en plein champ afin d'améliorer une diversité culturelle de pois chiche dans la région de Ain Defla (une ville du nord de l'Algérie). Les biomasses sèches des lignées ont été mesurées au stade de la floraison afin d'évaluer leur efficacité d'utilisation de la symbiose rhizobienne, et leur rendement en grains a été mesuré à la maturité dans des sols déficitaires en phosphore. Les objectifs de ce chapitre sont les suivants :

1. Connaître le rôle essentiel du phosphore dans la croissance et l'activité des nodosités.
2. Justifier la sensibilité de la fixation symbiotique de l'azote du pois chiche à la déficience en phosphore.
3. Analyser les relations existantes entre le contenu des nodosités en P, la nodulation, et la FSN, dont dépendent la croissance des génotypes de pois chiche et leur implication dans l'adaptation au déficit en P.
4. Évaluer la croissance et le rendement en grains de ces génotypes de pois chiche soumis à une déficience en phosphore.

Pour répondre à ces objectifs, des génotypes locaux de pois chiche ont été cultivés dans la région d'Ain Defla. À travers l'expérimentation, nous souhaitons comprendre le degré d'adaptation de ces génotypes à la déficience en phosphore. L'essai a été réalisé dans une exploitation agricole privée dans la région de Boumedfaa. Le choix du site a été motivé par l'absence d'utilisation d'engrais fertilisants et la déficience des sols en phosphore.

2. Matériel et méthodes

2.1. Localisation de l'essai et caractéristiques

Ce travail a été réalisé dans un cadre d'une collaboration avec la direction des services agricoles (DSA) de Boumedfaa dans la wilaya d'Ain Defla (Agroécosystème nord d'Algérie).

Il a été réalisé à travers in essai au champ qui a porté sur une parcelle appartenant à une exploitation agricole dans la région de Boumedfaa en culture pluviale durant la campagne agricole (2016-2017) (Figure II. 1).

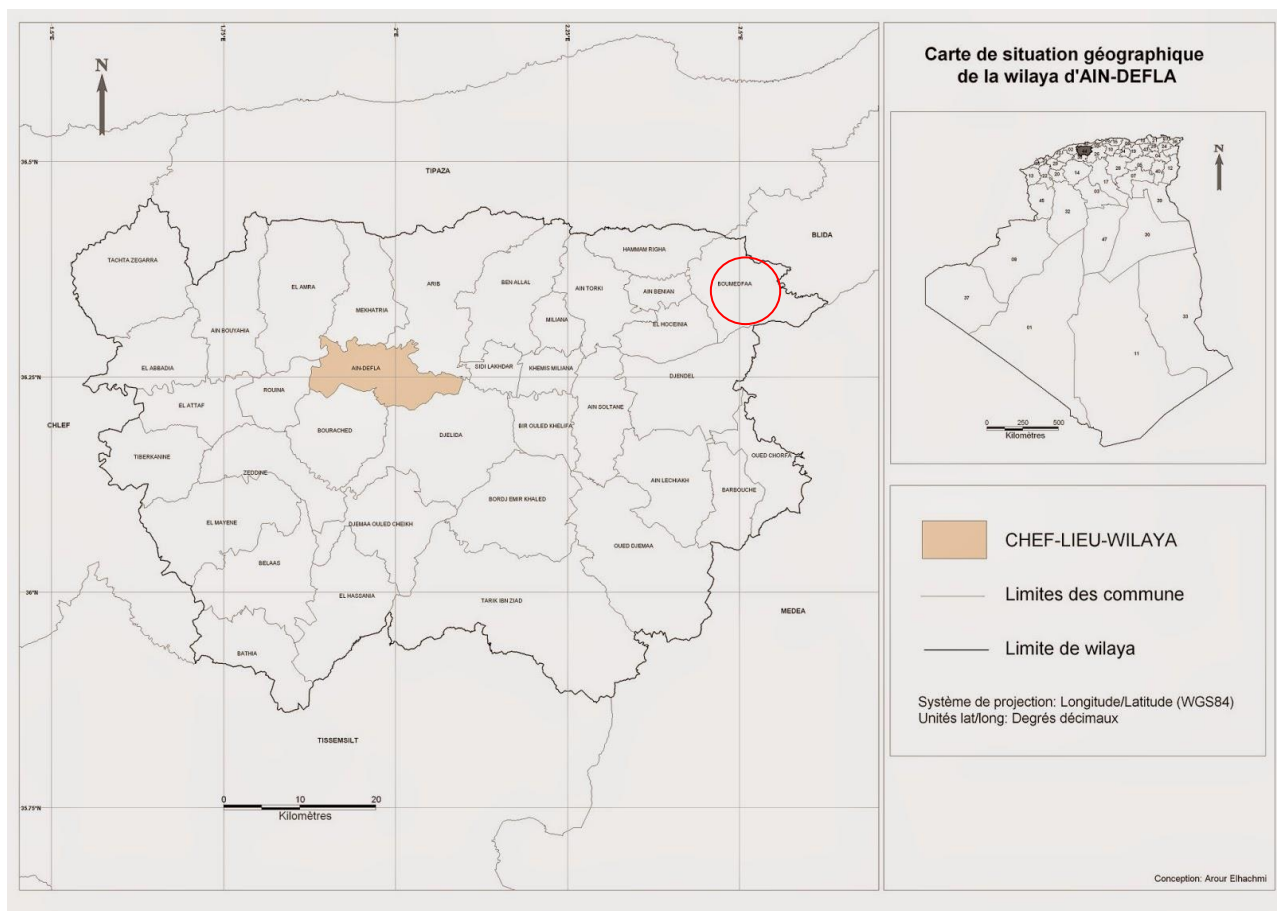


Figure II. 1 : localisation de l'essai dans l'agro écosystème d'AIN Defla (Algérie).

La région d'Ain Defla est caractérisée par un climat méditerranéen à hiver pluvieux et froid qui s'étale de mois de décembre au mois de mars avec une pluviométrie moyenne de 160.2 mm et une température moyenne de 11°C en janvier 2017. La période estivale est connue par ses températures excessives et une sécheresse plus ou moins accentuée. Elles se caractérisent par un été sec et chaud, un printemps réduit (Avril-Mai) avec une température moyenne de 20.3°C

en mois de mai, et un automne très court. La parcelle de Boumedfaa se situe à 318 m d'altitude (Latitude : 36°34'44.43°N et Longitude : 2°49'14.00°E.)

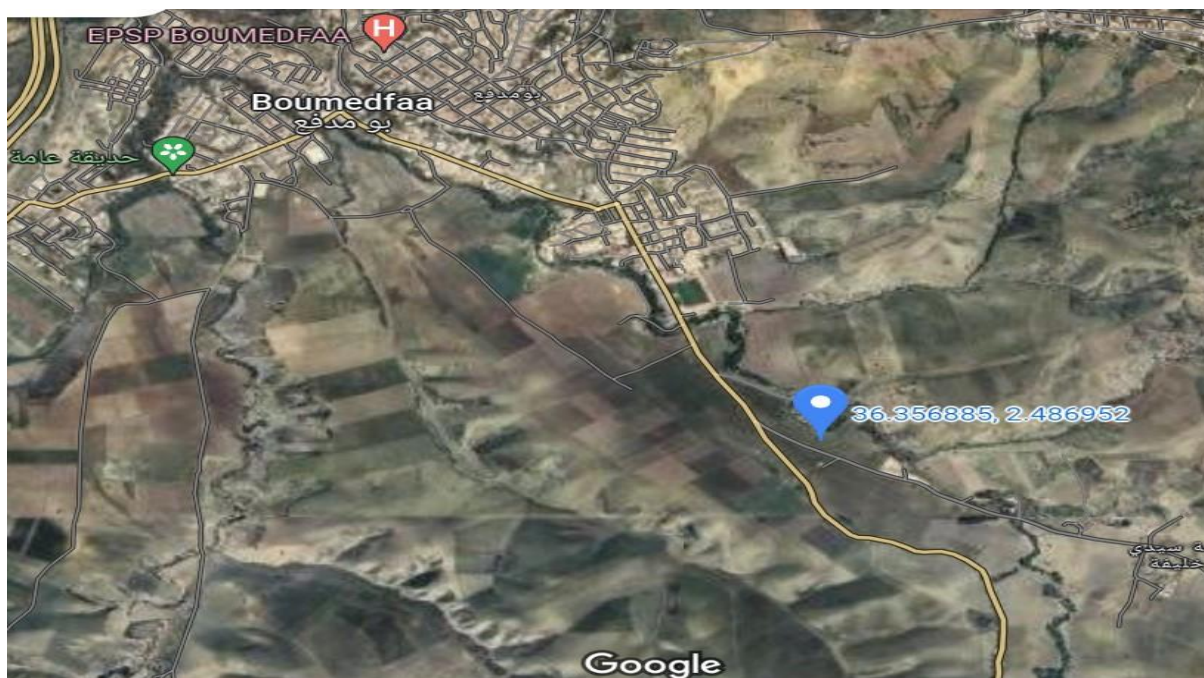


Figure II. 2 : localisation géographique de l'essai (Google Maps, 2024).

2.2. Le matériel végétal utilisé

Le matériel végétal utilisé est composé de sept géotypes locaux de pois chiche du type kabuli collectés dans différentes régions d'Algérie, ont été semés en 2017 (Tableau II. 1)

Tableau II. 1 : liste de géotypes de pois chiche utilisé à l'essai d'Ain Defla (Source : ITGC)

Nom variétale	Nom commun	classification	Type de grain	Tolérance à l'antracnose
FLIP 88-85C. (GHAB 5)	Ain Zada	Variétés locales en multiplication	Petit	Susceptible
FLIP 93-93C. (GHAB 4)	Oued Rhumel		Petit	Susceptible
FLIP 97-677C.	Souagui		Moyen	Tolérant
ILC 32-79	Chetoui 1		Petit	Tolérant
FLIP 90-13C.	Serraidi		Moyen	Tolérant
FLIP 84-92C.	Beni chogran		Moyen	Tolérant
FLIP 01-29C.	Makkerra		Moyen	Susceptible

L'essai a été installé en mi-mars 2017, après les travaux des sols y compris un labour avec charrue à soc réversible, un croisement avec cover-crop et un hersage afin de préparer un bon lit de semences. La croissance des plantes de l'essai était sous dépendance de la fixation de N₂

et sans ajout de fertilisants chimiques et même sans l'ajout d'irrigation puisque le semis a été fait dans la période hivernale.

Le semis des grains a été réalisé manuellement avec une densité de 10 graines par mètre linière à une profondeur de 4 à 5 cm (Tableau II. 2).

Tableau II. 2 : description expérimentale de l'essai de boumedfaa (Ain Defla)

Caractéristiques	Boumedfaa 2017
Type d'expérimentation	Bloc aléatoire complet à 3 répétitions
Nombre de génotypes/ bloc	7 génotypes locaux/bloc
Dimension de la parcelle totale (m ²)	348 m ² (29x12)
Surface de la parcelle élémentaire PE (m ²)	3m ²
Nombre de génotypes/PE	01
Nombre de ligne dans PE	05
Espacement entre ligne	0.5m
Espacement entre répétitions (blocs)	01m
Distance entre PE	01m



Figure II. 3 : essai de génotypes de pois chiche dans la région Boumedfaa -Ain defla-(2017)

2.3. Analyses physico-chimiques du sol

Afin de connaître les propriétés physico-chimiques du sol de la parcelle choisie, des échantillons de sol ont été prélevés à l'aide d'une tarière sur une profondeur de 30 cm avant la mise en place de l'essai. Les échantillons ont ensuite été séchés à l'air libre, puis tamisés à 2 mm pour les analyses ultérieures (Tableau II. 3).

2.3.1. Analyse physique granulométrie %

Cette analyse a été effectuée selon la technique de Rouiller (1994). L'analyse granulométrique, ou analyse physique, consiste à classer les éléments du sol selon leur taille et à déterminer le pourcentage de chaque fraction (sable, limon, argile). Elle a pour but de définir la texture du sol et, par conséquent, d'expliquer ses propriétés physiques, notamment son comportement vis-à-vis de l'eau. La détermination de la composition granulométrique se fait par l'analyse mécanique utilisant la pipette de Robinson.

2.3.2. Analyse chimique

2.3.2.1. Mesure de pH

Le pH de la solution du sol est déterminé à l'aide d'un pH-mètre. Il permet d'évaluer l'acidité ou l'alcalinité du sol ainsi que l'état du complexe argilo-humique. Pour mesurer le pH en eau, on ajoute 20 ml d'eau distillée à 10 g de sol finement tamisé. Le contenu est agité pendant 5 minutes dans un agitateur rotatif, puis laissé à reposer pendant 2 heures. Après ce temps, la mesure est effectuée à l'aide d'un pH-mètre.

Pour mesurer le pH en KCl, on ajoute 50 ml de KCl à 20 g de sol finement tamisé. Le contenu est agité pendant 5 minutes dans un agitateur rotatif, puis laissé à reposer pendant 2 heures. Après ce temps, la mesure est également réalisée à l'aide d'un pH-mètre.

2.3.2.2. La matière organique

En admettant que la composition moyenne de la matière organique du sol soit constante en carbone (58%), il suffit de déterminer la teneur en cet élément pour en déduire la quantité de matière organique présente, selon la méthode d'Anne (1945). Cette méthode repose sur la transformation du carbone en gaz carbonique sous l'action d'une quantité connue de solution oxydante, dont on détermine l'excès. L'oxydation est généralement effectuée à chaud, par action du bichromate de potassium ($K_2Cr_2O_7$) en milieu sulfurique. L'excès de $K_2Cr_2O_7$ est titré à l'aide d'une solution de sel de Mohr à 0,5 N en présence de diphénylamine comme indicateur coloré, avec un changement de couleur du bleu foncé au bleu vert. Après la détermination du pourcentage de carbone, la matière organique (MO) est calculée à l'aide de la formule suivante : $MO\% = C (\%) \times 1,724$.

2.3.2.3. La conductivité électrique

La conductivité électrique (C.E.) a été mesurée selon la méthode d'Aubert (1978). Le principe consiste à déterminer la salinité de l'extrait du sol. Cette mesure est effectuée en mélangeant 1/5 de sol avec 4/5 d'eau distillée.

Après une agitation de quelques minutes, la solution, maintenue à une température de 25°C, est soumise à une lecture à l'aide d'un conductimètre.

2.3.2.4. Le calcaire total (CaCO₃)

Le calcaire total est déterminé par le calcimètre de Bernard qui permet de mesurer le volume de CO₂ dégagé par action de l'acide chlorhydrique (HCl) sur le carbonate de calcium (CaCO₃) de l'échantillon du sol.

2.3.2.5. Phosphore assimilable (Olsen)

Selon la méthode d'Olsen et al. (1954), le dosage du phosphore (P) est effectué à l'aide d'une solution de bicarbonate de sodium (NaHCO₃ 0,5 M, pH 8,5 ± 0,1). On prélève un échantillon de 5 g de sol auquel on ajoute 100 ml de NaHCO₃ à 40%. Après 30 minutes d'agitation mécanique, une filtration est effectuée sur papier filtre pour éliminer les particules solides. Dans des tubes, 1 ml du filtrat surnageant est prélevé après centrifugation à 500 rpm de chaque échantillon, puis 1 ml d'acide ascorbique est ajouté, et le volume est complété à 10 ml avec de l'eau distillée. La mesure de la densité optique est effectuée à 710 nm, 30 minutes après l'ajout de l'acide ascorbique.

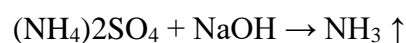
2.3.2.6. L'azote total (KJELDAHL)

Le dosage de l'azote total dans le sol est déterminé généralement par la méthode KJELDAHL, qui consiste une minéralisation, distillation et une titration.

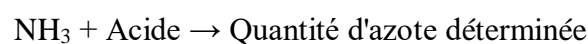
a. **Minéralisation** : L'échantillon est décomposé par une digestion d'acide fort (H₂SO₄ concentré) et un catalyseur, transformant l'azote organique en sulfate d'ammonium ((NH₄)₂SO₄).



b. **Distillation** : L'ammoniac (NH₃) est libéré du sulfate d'ammonium par alcalinisation d'addition de soude (Na OH) et collecté dans un acide faible (acide borique H₃BO₃).



c. **Titration** : La quantité d'ammoniac est mesurée par titration avec un acide de concentration connue (une solution d'acide chlorhydrique (N/100)), jusqu'au changement de la couleur verdâtre à la couleur rouge. Le volume d'acide chlorhydrique utilisé pour le titrage a servi à calculer le pourcentage d'azote, qui a ensuite été exprimé en mg d'azote par g de poids sec.



2.4. Echantillonnage et paramètres mesurés

Six semaines après le semis de pois chiche, au début de floraison de la plupart des génotypes misent en place qui correspond à une nodulation optimale traduisant le moment de la fixation symbiotique de l'azote, plusieurs paramètres ont été déterminés après un prélèvement au hasard de cinq plants pour chaque génotype fleurit/par blocs.

Ainsi, les paramètres de croissance retenus sont : le nombre des nodosités, la biomasse aérienne, racinaire et nodulaire sèche, le nombre des fleurs, la hauteur de la plante et puis l'efficacité d'utilisation de la symbiose rhizobienne (EUSR). La détermination de ces derniers paramètres a été suivie par l'analyse du contenu des plantes et nodosités en P et N.

2.4.1. La biomasse aérienne, racinaire et nodulaire

Après le prélèvement des plants de pois chiche, la hauteur des plants, le nombre des fleurs et les ramifications ont été déterminés. Ainsi, les nodules sont détachés des racines et dénombrés. Les biomasses sèches aériennes, racinaires et nodulaires ont été déterminées après séchage des plants à 70°C pendant 48 heures.

Après le séchage, les échantillons secs des plantes et nodosités ont été broyés en poudre fine et utilisés pour la détermination de leurs teneurs en P et en N.



Figure II. 4 : la croissance des génotypes de pois chiche (photos prises en 2017)

2.4.2. Efficacité d'utilisation de la symbiose rhizobienne (EUSR)

La pente de régression de la biomasse aérienne des plantes sur la biomasse sèches de leurs nodosités représente l'efficacité d'utilisation de la symbiose rhizobienne (EUSR) dont la droite de régression est sous la forme $Y=AX+B$ (Y =biomasse aérienne, X = biomasse nodulaire, A = EUSR, B = biomasse produite hors fixation non liée aux nodosités).



Figure II. 5 : récolte des plants de pois chiche au moment de la floraison qui coïncide avec la formation nodulaire (Photos originales prises en 2017)

2.4.3. Teneur de la partie aérienne et nodulaire en P

Le dosage du phosphore (P) présent dans la partie aérienne et les nodosités des plantes a été réalisé selon la méthode normalisée par AFNOR (1969), connue sous le nom de méthode vanadomolybdique après minéralisation du matériel végétal. Les échantillons ont été répartis dans des creusets à raison de 0,25 g de matière sèche par creuset, puis placés dans un four à 550°C pendant 6 heures. Les cendres obtenues ont été dissoutes dans 5 ml d'acide chlorhydrique d'environ 3 M et la solution obtenue a été transférée dans une fiole jaugée de 100 ml. La capsule a été rincée avec environ 50 ml d'eau distillée, qui ont été ajoutées dans la fiole. Ensuite, 25 ml de réactif vanadomolybdique ont été ajoutés précisément. La solution a été agitée et laissée reposer pendant 15 à 20 minutes pour permettre le développement de la coloration. Le volume de la solution a ensuite été ajusté à 100 ml avec de l'eau distillée. La solution finale a été examinée au spectrophotomètre à une longueur d'onde de 400 nm. La teneur en phosphore total a été exprimée en mg par L d'anhydride phosphorique (P_2O_5), déterminée en reportant l'absorbance mesurée de l'échantillon sur une courbe d'étalonnage.

2.4.4. Teneur de la partie aérienne, nodulaire en N

Par la méthode KJELDAHL, le dosage des parties aérienne et nodulaire en N a été réalisé. Une minéralisation du N organique suivi par une distillation et titration de la solution pour avoir le dosage d'azote dans l'échantillon (voir le paragraphe II.2.3.2.5.)

2.4. Analyses statistiques et traitement des données

L'analyse des données a été réalisée par ANOVA (logiciel IBM SPSS 21) à deux facteurs vu que le dispositif expérimental établi était un dispositif aléatoire complet avec trois répétitions à Boumedfaa. Les comparaisons entre les différentes moyennes ont été effectuées par le test post hoc Tukey HSD à 5% de probabilité. L'analyse de la régression linéaire a été faite à fin de déterminer la corrélation entre les paramètres testés.

3. Résultats

3.1. Les analyses physico-chimiques du sol

Les résultats du tableau II.3. montrent les propriétés physicochimiques du sol étudié. L'analyse granulométrique montre des pourcentages moyens similaires en argile (33%), en limon (45 %) et en sable (19%) qui démontre que notre sol est un sol limoneux argileux. La parcelle a un pH légèrement alcalin. De même, les résultats d'analyse du P assimilable et d'azote total, montrent que le sol a une faible teneur en P assimilable et pauvre en azote.

Tableau II. 3 : Caractéristiques physico-chimiques du sol –essai boumedfaa-

Caractéristiques physico-chimiques du sol	Site de Boumedfaa	Interprétation
Argile (%)	37,5	Sol limoneux argileux
Limon (%)	43,6	
Sable (%)	18,9	
pH	7,97	Sol légèrement alcalin
Matière organique (%)	1,44	Riche en MO
CE > 4 mmohs/cm	0,40	
CaCO ₃ (%)	25,07%	Présence du calcaire
P ₂ O ₅ (Olsen) assimilable (mg.kg ⁻¹)	10,23	Faible en P
N total (g.kg ⁻¹)	1,13	Pauvre en N

3.2. Performance générale de la croissance

Les résultats illustrés dans le tableau suivant (tableau II.4.) montrent la différence des paramètres de croissance des génotypes de pois chiche au moment de la floraison.

Sous les conditions du sol pauvre en phosphore, la croissance aérienne des génotypes de pois chiche est remarquablement différente d'un génotype à un autre. Dont, FLIP 97-677C. a

présenté la hauteur moyenne la plus faible avec un nombre assez important de floraison. En effet, le génotype FLIP 85-88C. a présenté la hauteur maximale d'environ 56 cm avec une floraison moyenne à faible (environ 30 fleurs par plant). La hauteur finale et les ramifications des plants de pois chiche ont montré une variation non significative. Tandis que, le nombre des fleurs a montré une différence significative dont FLIP 97-677C. et FLIP 84-92C. ont présenté une bonne floraison ce qu'on va la comparer avec la nodulation de ces deux derniers. En revanche, la différence de la hauteur des plants permet à nous conclure une différence de la biomasse aérienne sèche des génotypes de pois chiche, c'est ce qu'on va montrer par la suite.

Tableau II. 4. Hauteur, nombre des fleurs et ramification primaire des plants des génotypes de pois chiche.

Génotype	Hauteur finale NS	Nombre de fleurs *	Ramification I NS
FLIP 85-88C.	56,61 ± 2,28	29,51 ± 2,29	2,61 ± 0,24
FLIP 97-677C.	46,19 ± 3,75	41,94 ± 1,52	2,33 ± 0,33
FLIP 90-13C.	51,38 ± 3,27	28,07 ± 3,24	2,33 ± 0,28
FLIP 84-92C.	51,83 ± 2,75	40,88 ± 0,44	2,50 ± 0,34
FLIP 93-93C.	49,69 ± 3,40	29,55 ± 1,75	2,77 ± 0,11
FLIP 01-29C.	50,30 ± 3,49	28,38 ± 2,39	2,55 ± 0,24
ILC 32-79	49,16 ± 2,02	27,83 ± 3,15	2,33 ± 0,19

Les valeurs présentées dans le tableau sont la moyenne de cinq plants récoltés au moment de la floraison dans trois répétitions ± erreur standard. NS signifie que la différence n'est pas statistiquement significative. *signifie que les différences sont statistiquement significatives au seuil de probabilité $P \leq 0.05$.

3.3.Croissance des plantes et nodulation

La différence de la biomasse aérienne, racinaire et nodulaire sèche des génotypes de pois chiche sous déficience en phosphore est illustrée sur la figure suivante (Figure II. 6).

Sous un sol déficitaire en phosphore, les génotypes FLIP 90-13C. et FLIP 97-677 C., ont présenté le poids aérien le plus élevé avec environ 10,70 g alors que le génotype FLIP 93-93C. a présenté le plus faible poids aérien avec une variation de 16%. Quant à la biomasse racinaire, une différence hautement significative avec une variation de 6,52% entre les génotypes de pois chiche tel que FLIP 97-677C a présenté une moyenne élevée de $1,78 \pm 0,08 \text{ g.plant}^{-1}$ tandis que FLIP 93-93C. a présenté la moindre avec $1,02 \pm 0,05 \text{ g.plant}^{-1}$ (Figure II. 6. B).

Concernant la biomasse nodulaire des génotypes, des différences en réponses au déficit en P ont révélé une variation de 24% entre les génotypes. Dont le génotype ILC 32-79 a présenté la moyenne la plus élevée avec $1,12 \pm 0,3 \text{ g.plant}^{-1}$. Tandis que, Flip 90-13C a présenté la plus faible avec $0,68 \pm 0,025 \text{ g.plant}^{-1}$. En revanche, le taux de variation de la biomasse nodulaire entre les génotypes est important, aucune différence significative n'a été signalée (Figure II.6.C).

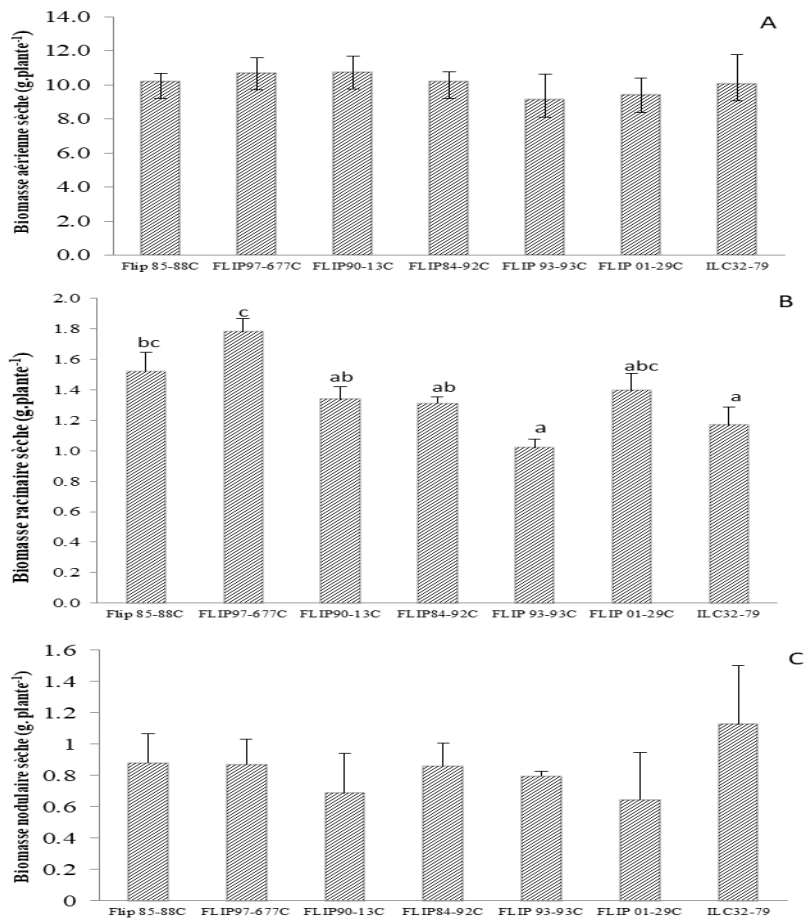


Figure II. 6. Biomasse des parties aériennes, racinaires et nodulaire des génotypes de pois chiche cultivés.

Les données sont les moyennes de cinq plants de pois chiche par trois répétitions récoltées au stade floraison des plantes.

3.4. La nodulation et l'EUSR

Suivant les objectifs visés en début de ce chapitre, le control de la nodulation des génotypes et la présence des rhizobia dans le sol est une partie primordiale vu son importance en efficience d'utilisation de la symbiose rhizobienne (Figure II.8).

Sous déficience en P, la nodulation varie largement en fonction des génotypes et son adaptation à un tel stress abiotique. Cependant la différence de nodulation reste non significative entre les génotypes d'où la majorité des génotypes nodulent d'une façon assez homogène en sol déficit en P. Ainsi, la biomasse aérienne sèche des sept génotypes de pois chiche varie d'une manière assez homogène avec une variabilité non significative d'où le génotype FLIP 90-13C qui a présenté une faible nodosité a présenté une moyenne élevée en biomasse aérienne sèche

(moyenne de $10,74 \pm 0,92$ et une variabilité de 14,89%) alors que le génotype FLIP 93-93C a présenté la moyenne la plus faible avec $9,11 \pm 1,50$ et une variabilité de 28,54% (Figure II.6.A). Malgré l'absence de différence significative dans la biomasse nodulaire (Figure II.6.C), la variation du nombre de nodules chez les génotypes de pois chiche (Figure II.7) a montré une différence également non significative mais contrastante avec la biomasse nodulaire. En effet, les génotypes présentant une biomasse nodulaire élevée (Ex. ILC 32-79) avaient tendance à avoir un nombre de nodules relativement faible, tandis que ceux avec une biomasse nodulaire plus faible (Ex FLIP 90-13C) présentaient un nombre de nodules plus élevé. Cette observation suggère une relation inverse entre la biomasse individuelle des nodules et leur nombre total, indiquant que certains génotypes favorisent le développement de nodules plus volumineux mais en moins grand nombre, alors que d'autres génotypes produisent de nombreux petits nodules. Ces résultats mettent en lumière la complexité des interactions symbiotiques entre les génotypes de pois chiche et les bactéries rhizobiennes, et soulignent la nécessité de comprendre les mécanismes sous-jacents qui régulent la formation et la croissance des nodules pour optimiser la fixation de l'azote et améliorer la productivité des cultures.

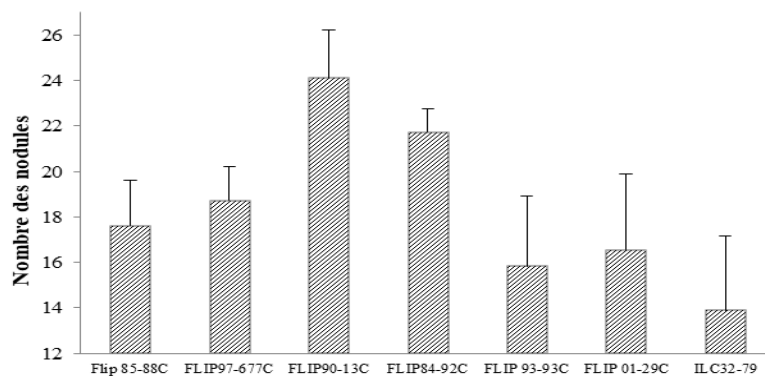


Figure II. 7. Nombre des nodules des génotypes de pois chiche cultivés.

Les données sont les moyennes de cinq plants de pois chiche par trois répétitions récoltées au stade floraison des plantes. Afin de bien comprendre la relation entre la nodulation et la croissance des génotypes cultivés sous déficience en P, la pente de la régression et le coefficient de la corrélation entre la nodulation et la biomasse aérienne estime l'efficacité de l'utilisation de la symbiose rhizobiums (EUSR). Cette EUSR illustrée sur la Figure II.8 a été évaluée en analysant la pente de la régression linéaire entre les biomasses aériennes et nodulaires de chaque génotype. Les données ont révélé des différences évidentes entre les génotypes misent sous déficience en P. Ainsi, les génotypes ILC 32-79, FLIP 85-88C, FLIP 93-93C et Flip 84-92 ont présenté une EUSR avec une corrélation positive (R^2 positif) tandis que le reste des génotypes ont présenté une diminution d'efficacité sous insuffisance de P (Figure II.8).

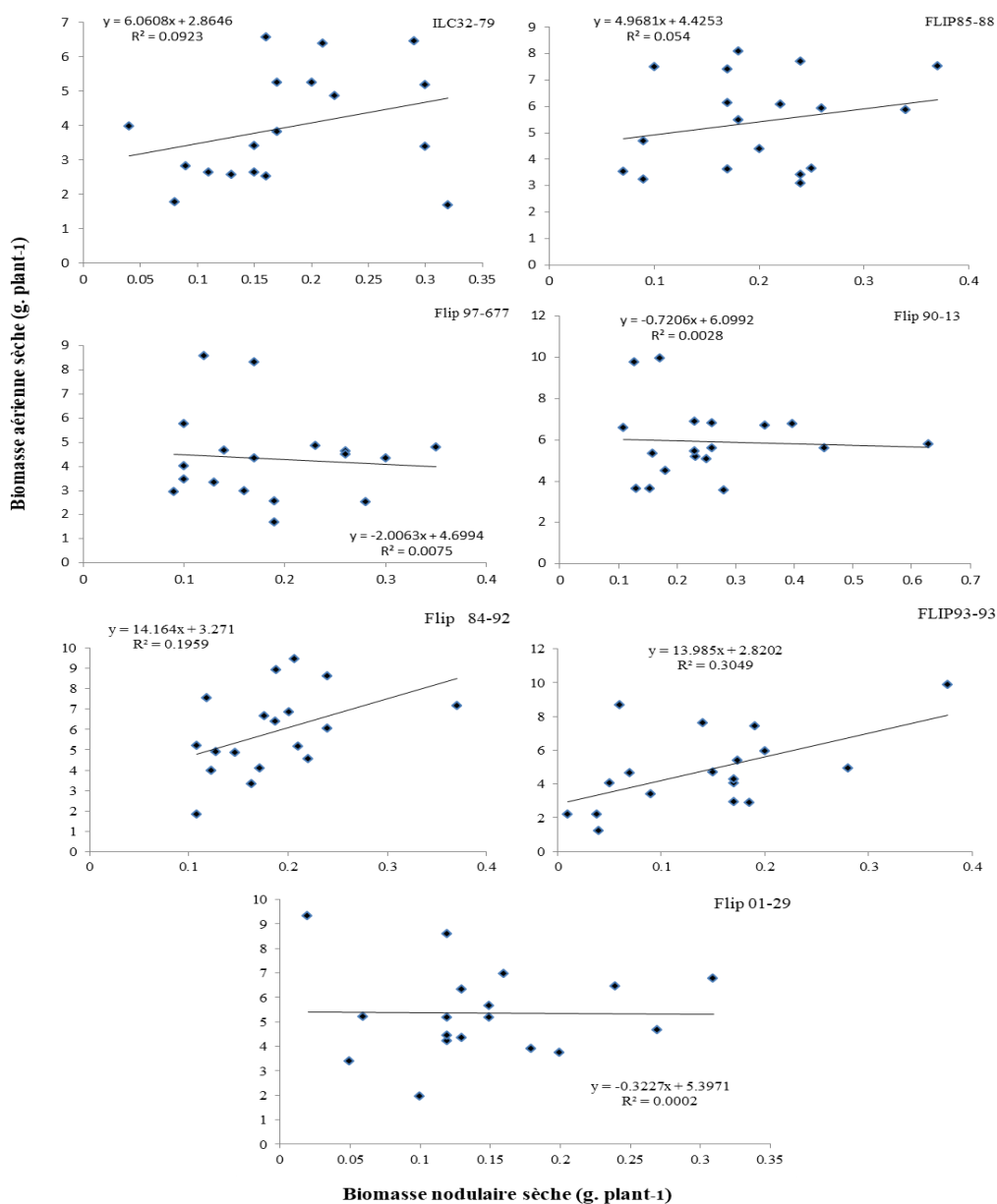


Figure II.8. EUSR des géotypes de pois chiche cultivés sous déficience en P.

Les données représentent les valeurs individuelles des plantes récoltées au moment de la floraison.

3.5. Disponibilité du phosphore aérien et nodulaire

La teneur de la partie aérienne en P est considérablement différente d'un géotype à un autre d'où la variabilité était très hautement significative avec 16% de variation dont le géotype Flip 93-93C a présenté la quantité la plus élevée en P aérien avec $5,77 \pm 0,02$ 09 mg. g⁻¹ MS tandis que Flip 97-677 C a présenté la faible avec $3,47 \pm 0,09$ mg. g⁻¹ MS (Figure II.9.A).

Le phosphore disponible dans les nodosités des géotypes de pois chiche présent généralement entre 6 à 9 mg.g⁻¹ MS (Figure II.9.B). Sous les conditions de déficience en P, le géotype FLIP 93-93C. a présenté une moyenne assez acceptable de P en biomasse nodulaire ($9,07 \pm 0,20$ mg.

g^{-1} MS et une variabilité de 3,85%) alors que les génotypes FLIP 97-677C et FLIP 01-29C ont donné les faibles moyennes ($6,04 \pm 0,09$ mg. g^{-1} MS et $6,22 \pm 0,02$ mg. g^{-1} MS) respectivement (Figure II.9.B).

Sous ces conditions d'insuffisance en P, les moyennes des teneurs en P nodulaire varient d'un génotype à un autre avec une différence très hautement significative (p value $\leq 0,05$) ce qui nous a obligés de classer chaque génotype dans un groupe homogène.

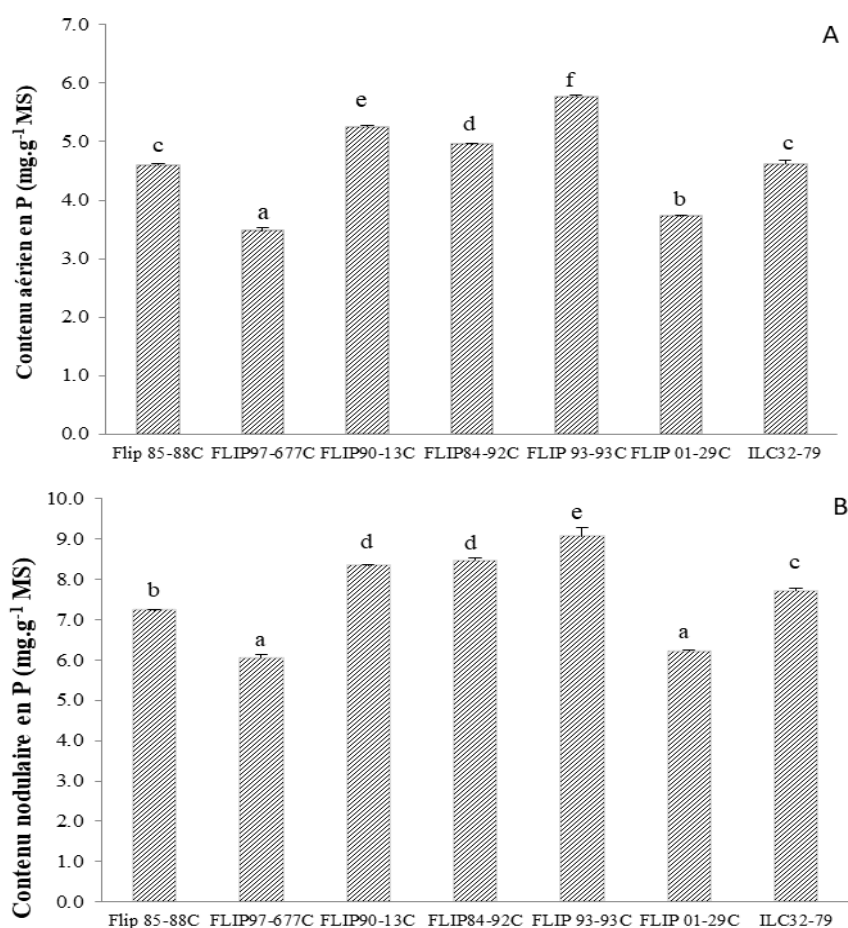


Figure II.9 Teneur de P dans la partie aérienne (A), nodulaire (B) des génotypes de pois chiche cultivés sous déficience en P.

Les données représentent les moyennes de trois répétitions récoltées au moment de la floraison. La différence était très significative avec plusieurs groupes homogènes chevauchants.

Néanmoins, l'étude de la variabilité de la nodulation en fonction de la teneur de la biomasse nodulaire en P est primordiale par l'évaluation de degrés de corrélation existante entre la biomasse nodulaire et leur teneur en P et c'est ce qui est montré par la suite en figure II.10.

L'étude de la corrélation entre la biomasse nodulaire et son contenu en P chez les génotypes de pois chiche a révélé une relation positive significative. Les génotypes présentant une biomasse nodulaire plus élevée avaient également des concentrations plus élevées de P dans leurs

nodosités. Cette corrélation suggère que la capacité des nodules à accumuler du P est proportionnelle à leur taille et à leur masse. Parmi les génotypes étudiés, le génotype FLIP 93-93C et ILC 32-79 ont montré la meilleure corrélation, avec une biomasse nodulaire substantielle ($0,79 \pm 0,05 \text{ g.plant}^{-1}$ et $1,12 \pm 0,3 \text{ g.plant}^{-1}$ respectivement) accompagnée de niveaux élevés de P ($9,07 \pm 0,20 \text{ mg. g}^{-1} \text{ MS}$ et $7,72 \pm 0,1 \text{ mg. g}^{-1} \text{ MS}$ respectivement), indiquant une efficacité supérieure dans l'accumulation de ce nutriment essentiel. En revanche, le génotype Flip 01-29C a présenté la corrélation la plus faible, avec une biomasse nodulaire relativement basse ($0,63 \pm 0,05 \text{ g.plant}^{-1}$) et un contenu en P réduit ($6,22 \pm 0,04 \text{ mg. g}^{-1} \text{ MS}$) (Figure II.10). Ces résultats mettent en évidence l'importance de la sélection de génotypes optimaux pour maximiser l'efficacité de la symbiose rhizobienne et améliorer l'absorption de nutriments cruciaux comme le phosphore, ce qui est essentiel pour la croissance et la productivité des cultures. L'identification et l'utilisation de génotypes avec une forte corrélation entre la biomasse nodulaire et le contenu en P peuvent conduire à des stratégies agricoles plus efficaces, améliorant ainsi la fixation de l'azote et la fertilité globale des sols.

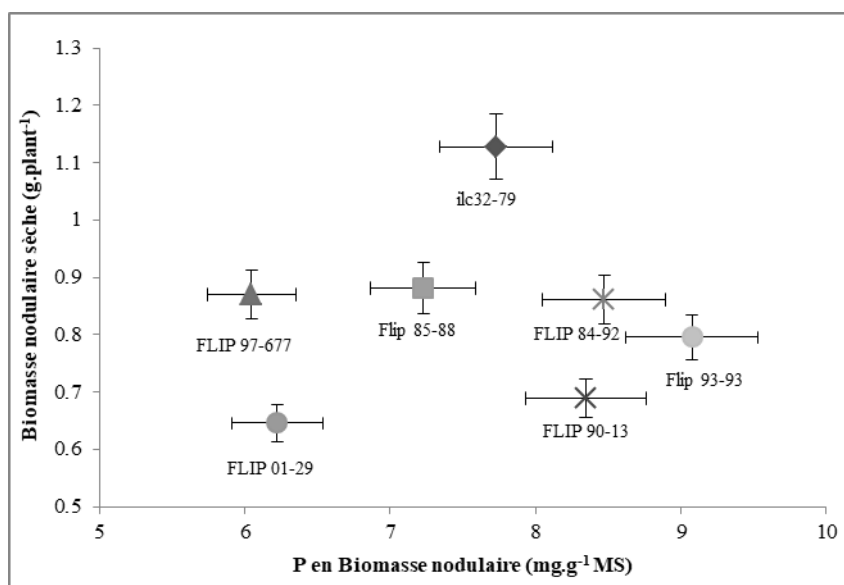


Figure II.10 Corrélation de la biomasse nodulaire et la teneur en P des nodosités des génotypes de Pois chiche cultivés sous déficience en P.

Les données représentent les moyennes \pm Ecart Type de trois répétitions récoltées au moment de la floraison.

Afin d'analyser plus précisément les relations entre la croissance des génotypes de pois chiche et l'efficacité d'utilisation du phosphore, l'analyse des résultats en termes d'EUP montre une variation significative qui semble dépendre à la fois des génotypes cultivés et leurs capacité d'absorber le phosphore du sol rhizosphérique (Figure II. 11).

En effet, l'EUP varie entre 1,5 et 3 pour Flip 93-93C et Flip 97-677C respectivement. Cette efficacité est significativement plus importante chez les génotypes Flip 97-677C (30%) et ILC32-79 (25%) en comparaison avec les génotypes Flip 93-93C (15%), Flip 90-13C et Flip 84-92C (20%).

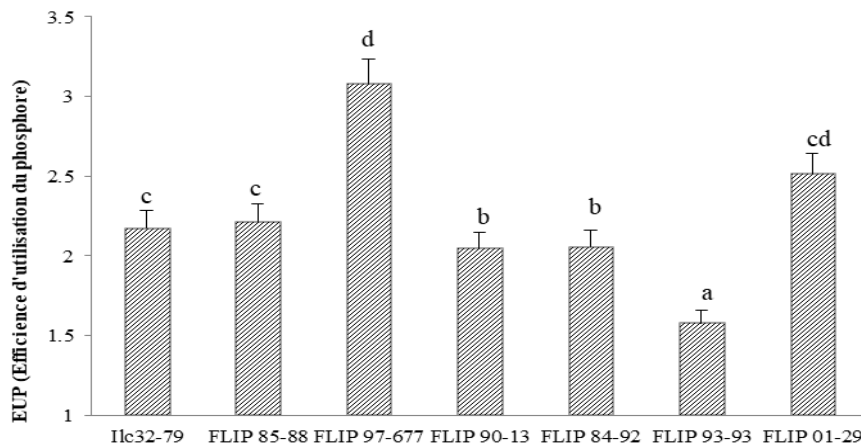


Figure II.11 EUP ‘efficacité d’utilisation du phosphore’ des génotypes de pois chiche cultivés sous déficience en P.

Les données représentent les moyennes de trois répétitions récoltées au moment de la floraison.

3.6. Disponibilité d’azote aérien et nodulaire

Pour quantifier les teneurs en azote accumulées dans les différentes parties de la plante, particulièrement au stade de pleine floraison, critique pour la fixation symbiotique de l’azote, la concentration en azote total a été mesurée dans les tissus des nodules et de la partie aérienne. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau II.5. Selon l’ANOVA, les génotypes de pois chiche montrent une variation très hautement significative ($p \leq 0,001$) de la concentration en azote dans la partie aérienne et les nodules au stade de pleine floraison. La concentration en azote dans la partie aérienne varie de 18,1 à 22,8 mg N kg⁻¹ de poids sec. En particulier, la concentration en azote dans la partie aérienne est la plus élevée chez Flip 90-13C et la plus faible chez Flip 84-92C. La teneur en azote dans les nodules varie de 41,7 à 47,1 mg N kg⁻¹ de poids sec des nodules, avec la teneur la plus élevée observée chez Flip 90-13C (Tableau II.5). Les génotypes Flip 84-92C, Flip 85-88C, et Flip 01-29C présentent des concentrations en azote similaires dans les nodules et les parties aériennes, avoisinant environ 18 mg N kg⁻¹ de poids sec pour la partie aérienne et 42 mg N kg⁻¹ de poids sec des nodules. Le génotype Flip 90-13C, en raison de sa concentration supérieure en azote dans les nodules et la partie aérienne, ainsi que sa capacité accrue à fixer l’azote atmosphérique, se distingue comme un candidat prometteur pour les programmes de sélection visant à améliorer l’efficacité de la fixation de

l'azote. Cette caractéristique peut être particulièrement bénéfique pour les systèmes de culture nécessitant une fertilité accrue et une meilleure utilisation des nutriments.

Tableau II.5 : Concentration de l'azote dans la partie aérienne et nodulaire chez les géotypes de pois chiche sous déficience en P.

N content		
géotypes	Shoot N concentration mg N kg ⁻¹ SDW	Nodule N concentration mg N kg ⁻¹ NDW
Ilc32-79	19,6 ± 0,06 c	45,1 ± 0,2 bc
Flip 85-88C	18,5 ± 0,1 e	41,7 ± 0,3 f
Flip 97-677C	21,4 ± 0,08 ab	46,4 ± 0,2 ab
Flip 90-13C	22,8 ± 0,2 a	47,1 ± 0,1 a
Flip 84-92C	18,1 ± 0,1 ef	42,9 ± 0,1 e
Flip 93-93C	20,3 ± 0,05 b	45,6 ± 0,3 b
Flip 01-29C	18,8 ± 0,08 d	43,6 ± 0,2 d
P value		
	< 0.001	< 0.001

Les valeurs représentent la moyenne de 03 répétitions ± ET (Ecart type). Les lettres (a,b,c,d) représentent la signification ANOVA à un facteur (géotype) ($p < 0.05$).

3.7. Le rendement en grains des géotypes de pois chiches

Comme le montre la figure II.12, les composantes du rendement et le rendement en grains variaient selon les géotypes de pois chiche. Des interactions statistiques significatives ont été observées entre les géotypes pour le nombre de gousses et de graines, le poids de 100 graines, et le rendement en grains. Il est intéressant de noter que le géotype FLIP01-29C, malgré le plus petit nombre de gousses et de graines, a montré le poids de graines le plus élevé (Figure II.12). En outre, les géotypes FLIP90-13C, FLIP93-93C et FLIP85-88C ont présenté les taux de rendement en grains les plus élevés. À l'inverse, les géotypes FLIP01-29C et FLIP97-677C ont montré les valeurs les plus faibles pour le nombre de gousses et de graines, ce qui a entraîné les rendements en grains les plus bas parmi tous les géotypes étudiés (Figure II.12).

Les résultats montrent que le rendement des géotypes a été fortement impacté par des conditions de croissance défavorables. Cependant, le poids des graines a été maintenu quel que soit l'environnement de culture. Cela suggère que les géotypes ont déclenché des adaptations physiologiques pour assurer le bon remplissage des réserves des grains. Ce résultat prouve que dans des conditions de faible disponibilité de phosphore, tous les géotypes de pois chiche développent des adaptations biologiques pour maintenir la production. Ces adaptations peuvent inclure des mécanismes tels que l'augmentation de l'efficacité de l'utilisation du phosphore, l'amélioration de la symbiose avec les rhizobiums, ou la redistribution interne des nutriments pour favoriser la croissance et le développement des graines malgré les contraintes environnementales.

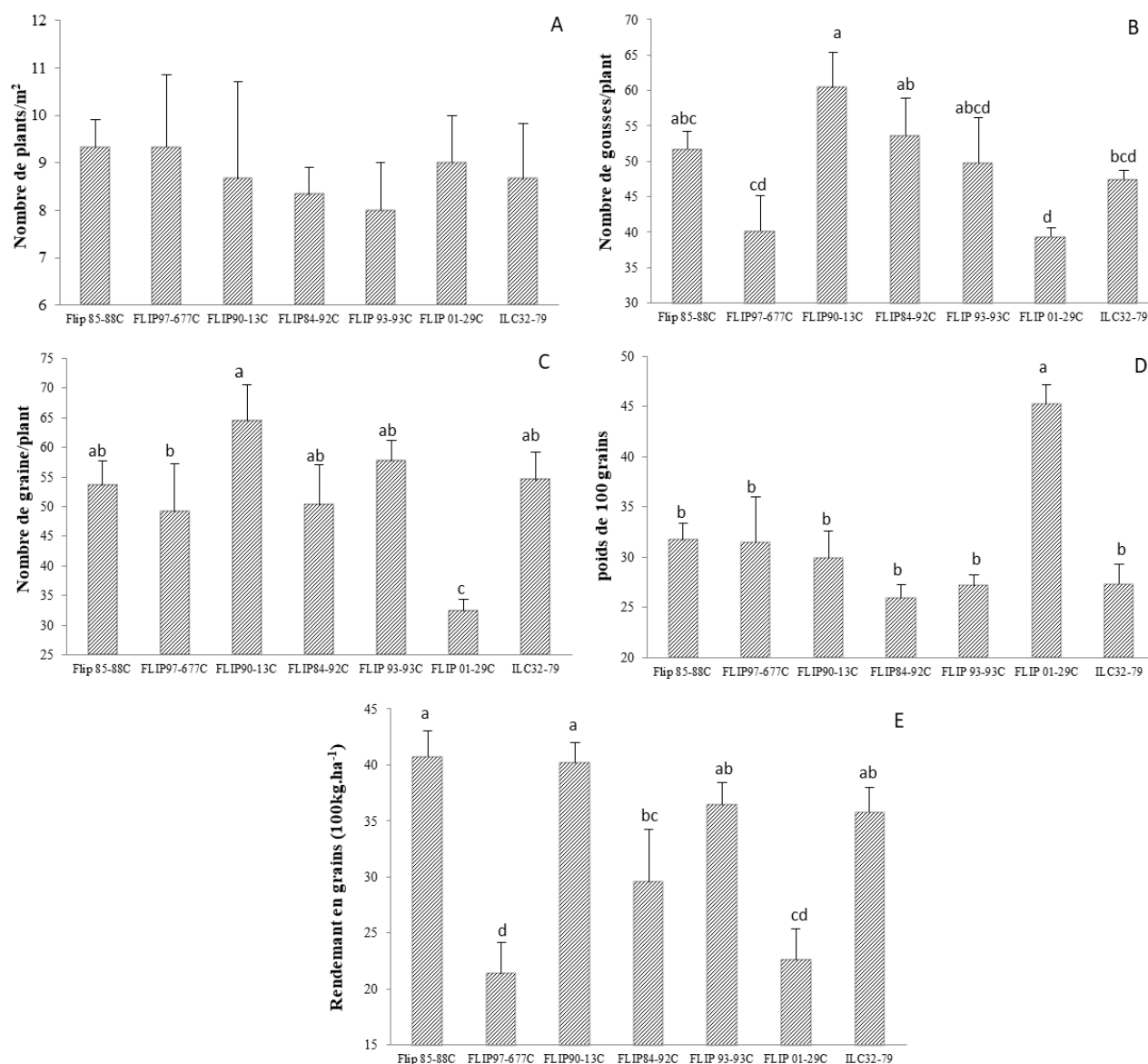


Figure II.12. Evaluation du rendement en grains et ces composantes des génotypes de pois chiche cultivés sous déficience en P.

Nombre de plants (A), nombre de gousses (B), nombre de graines (C), poids de 100 graines (D) ont été mesurés à la maturité des graines. Le rendement (E) a été calculé à partir de ces composantes. Les données sont les moyennes de plants de pois chiche récoltés par trois répétitions au stade maturité des graines. Les lettres (a,b,c,d) représentent la signification ANOVA à un facteur (génotype) ($p < 0.05$).

4. Discussion

Les systèmes agricoles à faibles intrants, visant à réduire les apports extérieurs et à optimiser l'utilisation des ressources internes, sont de plus en plus valorisés. Cependant, cette démarche se heurte encore à de nombreux défis, notamment l'efficacité limitée des cultures dans des environnements pauvres en nutriments. Pour surmonter ces obstacles, l'un des leviers les plus

prometteurs est le développement de variétés de cultures améliorées, capables de tolérer les contraintes environnementales. Ces nouvelles variétés permettraient de maintenir des rendements élevés tout en répondant aux exigences d'une agriculture durable et résiliente.

Dans cette étude, une variabilité génotypique significative a été observée parmi les différents génotypes de pois chiche cultivés sous déficience en P en ce qui concerne tous les paramètres de croissance, de nodulation et de rendement. Les génotypes ont montré des différences marquées dans leur taux de croissance, leur capacité à la nodulation et leur productivité finale. Les résultats indiquent que certains génotypes sont plus performants que d'autres en termes de développement végétatif et de capacité à fixer l'azote atmosphérique grâce à la formation de nodules. L'analyse de la nodulation met en évidence une relation intrigante entre la biomasse nodulaire et le nombre de nodules. Notamment, le génotype Flip 90-13 se caractérise par une faible biomasse nodulaire mais un nombre élevé de nodules, tandis que le génotype ILC 32-79 présente le profil inverse avec une biomasse nodulaire élevée et un nombre de nodules réduit. Ces observations soulignent l'importance de la qualité des nodules plutôt que leur quantité (Figure II.7 et II.6).

De manière encore plus remarquable, notre étude révèle que l'efficacité d'utilisation de la symbiose rhizobienne est étroitement corrélée à la biomasse nodulaire et non au simple nombre de nodules. Le génotype ILC 32-79, avec sa biomasse nodulaire élevée, démontre une meilleure efficacité d'utilisation de la symbiose, ce qui se traduit par une biomasse aérienne plus importante et une meilleure performance globale de la plante (Figure II.8). Cela suggère que la capacité des nodules à fixer l'azote de manière efficace est un facteur déterminant pour l'amélioration de la productivité des cultures.

Ces résultats ont des implications significatives pour la sélection et l'amélioration des variétés de pois chiches. En se concentrant sur les génotypes présentant une biomasse nodulaire élevée et une forte efficacité de la symbiose rhizobienne, il est possible de développer des cultivars plus résilients et productifs dans des conditions de faible disponibilité en P. De plus, cette approche pourrait également contribuer à une utilisation plus efficace des ressources naturelles, en réduisant la dépendance aux engrais phosphatés et en promouvant des pratiques agricoles plus durables.

En termes de rendement, les génotypes se distinguent par des différences notables dans le nombre de gousses et graines par plante, le poids des graines et le rendement global en grains. L'analyse des rendements montre une relation étroite entre le nombre de gousses et de graines et la productivité globale. Les génotypes tels que Flip 90-13, qui présentent un nombre élevé de graines, affichent des rendements élevés. À l'inverse, les génotypes comme FLIP 01-29,

malgré un poids de 100 grains élevé, montrent des rendements plus faibles. Parmi les génotypes étudiés, FLIP 85-88C, Flip 90-13C, FLIP 93-93C et ILC 32-79 ont montré le meilleur rendement sous déficience en P (Figure II.12). Cette divergence indique que la production globale de graines, en termes de nombre, joue un rôle plus crucial dans la détermination du rendement que le poids individuel des graines. Cela suggère que les génotypes de pois chiche ont déclenché une adaptation physiologique par sa résistance de poids de 100 grains à cette déficience et qui rends par la suite le rendement influencé par le nombre des gousses et graines. Les résultats obtenus concordent avec ceux rapportés par Upadhayaya et Chapai (2024), qui ont observé une amélioration significative du rendement et de croissance de pois chiche sous l'effet de différents fertilisants phosphatés. De même, dans leurs études sur la réponse de la croissance et du rendement des pois chiches à l'application de phosphore, Singh et al. (2024) ont constaté une amélioration notable avec l'utilisation de diverses combinaisons de traitements phosphatés. Ainsi, des variations d'efficacité d'absorption et d'utilisation du P (PUE) ont été observées chez les génotypes de pois chiche présentant une diversité génétique en termes de croissance, d'acquisition et d'utilisation du P, confirmant ainsi notre hypothèse initiale. Les résultats ont révélé une large variabilité des traits végétaux parmi les génotypes ; ILC 32-79 et FLIP 97-677 se sont démarqués par leurs biomasses aériennes et nodulaires élevées, tandis que FLIP 93-93 et FLIP 90-13 ont excellé en termes de teneur en P des parties aériennes et nodulaires (Figure II.11). Ces résultats corroborent les observations d'études antérieures. Dans leurs études sur l'effet de l'application de phosphore sur le haricot, Shimelis et al. (2019) ont obtenu de meilleurs résultats dans les sites à faible apport en P (47 à 53 %) que dans ceux à apport élevé en P (9 à 24 %). Bien que les rendements du haricot aient réagi positivement à l'ajout de P, la faible fertilité des sols limite considérablement les rendements des légumineuses à grains, malgré de bonnes performances symbiotiques. La variabilité génotypique du pois chiche et son efficacité d'utilisation du P ont déjà été documentées dans diverses conditions de croissance contrôlées, Pang et al. (2018) ont observé une différence très hautement significative en termes de croissance, de teneur en phosphore dans la partie aérienne et d'efficacité d'utilisation du P pour 226 génotypes de pois chiches cultivés dans des pots contenant du sable de rivière stérilisé, enrichi avec $10 \mu\text{g}$ de P.g^{-1} de sol sous forme de FePO_4 (une forme peu soluble de phosphore). Ainsi, dans leurs études basées sur des expériences de culture en pot de 20 génotypes de pois chiches avec des niveaux variés de P ajouté au sol, Srinivasarao et al. (2006) ont mis en évidence des différences génotypiques significatives dans la croissance des racines et des pousses, ainsi que dans l'absorption et l'efficacité d'utilisation du P. Aussi, L'analyse de la corrélation entre la biomasse nodulaire et la teneur en phosphore des nodosités chez les

génotypes de pois chiche cultivés en conditions de carence en P a révélé des différences marquées entre les génotypes étudiés. ILC 32-79 s'est distingué par une capacité d'absorption de P supérieure par ses nodules, malgré leur nombre limité. En revanche, Flip 90-13 et Flip 01-29 ont présenté une faible absorption de P par leurs nodules. Ces observations soulignent l'importance de la qualité des nodules, au-delà de leur nombre, dans l'efficacité d'acquisition du phosphore chez les pois chiches. Cela confirme et étend les résultats antérieurs concernant la variabilité génotypique des légumineuses de l'absorption des nutriments azotés et phosphorés. Ces observations soulignent l'importance de la diversité génétique pour l'adaptation à des environnements limités en ressources. Elles mettent en évidence la pertinence de l'ensemble actuel de cultivars pour initier un programme de sélection ciblé, visant à améliorer la tolérance au P dans la production. Pour faire face à une carence en phosphore, les plantes peuvent adopter diverses stratégies visant à améliorer l'acquisition et l'absorption du P, ou à optimiser son utilisation (Stevens *et al.*, 2019). Cette carence affecte la formation des nodules et a un impact négatif sur la fixation de l'azote, comme l'ont démontré Zerihun (2017), Valentine *et al.* (2017), et Liu *et al.* (2018).

Notre étude approfondit la compréhension des mécanismes agronomiques en montrant la variabilité des traits liés au rendement en réponse à une faible disponibilité en P. Nous avons observé que certains génotypes maintiennent une croissance vigoureuse et une productivité élevée malgré des niveaux de P suboptimaux. Cela suggère des adaptations physiologiques et morphologiques particulières qui permettent une utilisation plus efficace des ressources disponibles. Cela nécessite autre recherche sur l'activité des souches rhizobienne et leur rôle en amélioration d'absorption du P. dont la compatibilité de ces souches avec les variétés de légumineuses hôtes joue un rôle crucial dans l'optimisation de la productivité des légumineuses à grains (Allito *et al.*, 2015). Les souches de rhizobium varient considérablement en termes de tolérance au déficit en P (Marra *et al.*, 2019) et de capacité à solubiliser le P (Mabrook *et al.*, 2019). Par conséquent, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour identifier les interactions les plus efficaces entre les génotypes de pois chiches capables d'utiliser le phosphore et les souches rhizobiennes dans des sols pauvres en phosphore.

5. Conclusion

La déficience en phosphore exerce des effets variables sur les caractéristiques de croissance et de rendement des différents génotypes de pois chiche, mettant en évidence la présence de mécanismes adaptatifs spécifiques qui permettent aux plantes de maintenir leur efficacité physiologique. Par ailleurs, la carence en P peut affecter l'établissement de la symbiose de

manière spécifique à chaque génotype. Cette recherche apporte des insights précieux sur les mécanismes de la nodulation et leur impact sur la performance agronomique des pois chiches. Elle ouvre la voie à des stratégies innovantes de sélection et de gestion des cultures, visant à améliorer la résilience et la productivité des systèmes agricoles dans des environnements contraints par des ressources limitées.

Nos résultats indiquent que l'efficacité d'acquisition et d'utilisation du P pour la formation des nodules, essentiels pour une croissance optimale. À partir de ces observations, nous proposons diverses stratégies de sélection basées sur les propriétés uniques des génotypes adaptés aux conditions agro-écologiques de l'Algérie. Ces stratégies visent à promouvoir la culture du pois chiche comme une légumineuse à haute fixation de l'azote dans les systèmes agricoles à faibles intrants. Nous croyons que cette approche peut fournir une base solide pour le développement de programmes de sélection ciblés, visant à améliorer la tolérance à la carence en phosphore de cette culture essentielle.

*Le système association de culture pois chiche-blé dur
améliore l'absorption des éléments nutritifs et le rendement
en grains sous déficience en phosphore*

Chapitre III

Le système association de culture pois chiche-blé dur améliore l'absorption des éléments nutritifs et le rendement en grains sous déficience en phosphore

1. Introduction

La disponibilité et l'absorption des nutriments constituent des facteurs limitants cruciaux pour la croissance et le rendement des cultures dans les agroécosystèmes à faible intrant (Lazali et al., 2021). On estime que 5,7 milliards d'hectares de terres à travers le monde sont déficients en P. Les concentrations de phosphate dans les solutions du sol sont généralement inférieures à 10 mM, ce qui est nettement en dessous du seuil critique nécessaire pour une performance optimale des cultures (Lambers, 2022). L'application d'engrais concentrés, qui fournissent du P soluble aux plantes, pourrait atténuer ce problème de carence. Toutefois, cette approche est fondamentalement inefficace en raison de l'immobilisation chimique du P et du ruissellement agricole (Hinsinger et al., 2011). Dans les systèmes agricoles intensifs, jusqu'à 80 % du P appliqué peut être immobilisé dans le sol par des processus de précipitation et d'adsorption (Lazali et Bargaz, 2017), obligeant les agriculteurs à utiliser jusqu'à cinq fois la quantité d'engrais P nécessaire pour les cultures, ce qui entraîne une surcharge en P des sols agricoles. De plus, la durabilité à long terme de l'application d'engrais phosphatés est remise en question, car les réserves mondiales de phosphate naturel de haute qualité, source de ces engrais, s'épuisent rapidement (Dawson et Hilton, 2011).

Certaines études ont démontré que la culture intercalaire est une stratégie efficace pour obtenir des rendements élevés de qualité supérieure (Jensen, Carlsson et Hauggaard-Nielsen, 2020). Définie comme la culture simultanée de plusieurs espèces sur la même parcelle et au même moment (Zhang et al., 2020), elle est largement pratiquée dans les pays en développement. Ce système agricole, qui fournit plus de 15 % de l'alimentation humaine et animale (Liu et al., 2017), se distingue par ses nombreux avantages comparatifs à la monoculture, notamment un rendement accru, une utilisation plus efficace des ressources, une meilleure conservation des sols, et une réduction des mauvaises herbes, des insectes et des maladies (Madembo, Mhlanga et Thierfelder, 2020). En outre, la réintroduction de légumineuses fixatrices de N₂ dans les systèmes de culture représente une pratique durable de diversification des espèces.

Les légumineuses établissent des symbioses avec des rhizobia fixateurs de N_2 et des champignons mycorhiziens, facilitant l'acquisition de nutriments (Lazali et al., 2017). Les interactions microbiennes dans la rhizosphère peuvent être bénéfiques ou nocives, selon les souches microbiennes, l'espèce végétale et le type d'interaction (Pathan et al. 2020; Jones et Hinsinger 2008). Les micro-organismes utilisés comme biofertilisants incluent des bactéries fixatrices d' N , solubilisant le P , produisant des phytohormones et de l'eau (Chamkhi et al., 2021).

La culture intercalaire céréales-légumineuses est un système de production agricole durable, offrant des avantages significatifs en termes de rendement et d'absorption des nutriments grâce à une utilisation efficace des ressources naturelles (Huang et al., 2019; Zhang et al., 2020; Lazali et al., 2021). Elle améliore la biodisponibilité des nutriments comme le P , Fe , Zn et Mn , augmentant ainsi leur acquisition par les cultures (Li et al., 2014). Chaque espèce a une capacité différente à mobiliser ces éléments, et leur culture conjointe peut accroître cette mobilisation pour les deux espèces. La recherche s'est principalement concentrée sur P en raison de sa faible biodisponibilité et de son importance pour la productivité des cultures. Les cultures intercalaires améliorent l'acquisition de phosphore (P) à partir de sources peu solubles dans divers systèmes, y compris en pot, en rhizoboxe, en hydroponie et en plein champ (Xue et al., 2016). Cette augmentation est due à une meilleure utilisation des formes organiques et inorganiques de P , grâce à l'excrétion d'acides organiques ou de H^+ par certaines légumineuses dans leur rhizosphère (Lazali et al., 2021). Les espèces comme le lupin, le pois chiche et la féverole excrètent des acides organiques ou des protons, solubilisant ainsi le P pour améliorer son acquisition dans des systèmes de culture intercalaire. Cette stratégie est particulièrement bénéfique sur les sols calcaires à faible disponibilité en P (Li et al., 2004, Hinsinger et al., 2003, Pearse et al., 2006, Li et al., 2007). Dans de nombreuses régions céréalières en Algérie, la faible disponibilité de P limite l'utilisation des légumineuses à grains, affectant la fixation biologique de N_2 (Lazali, Brahimi, et Drevon, 2018). Ce chapitre examine comment la culture intercalaire légumineuses-céréales peut améliorer la disponibilité du P et, par conséquent, la croissance et la productivité des plantes dans les sols déficients en P du nord de l'Algérie. L'objectif principal était d'étudier l'impact positif de la culture intercalaire légumineuses-céréales sur la disponibilité du P dans le sol, favorisant ainsi une croissance optimale des plantes et maximisant la productivité agricole. En examinant les interactions entre deux espèces co-cultivées dans un sol pauvre en P , nous avons cherché à comprendre les relations synergiques et compétitives entre ces plantes. Les résultats peuvent ouvrir la voie à des approches innovantes pour améliorer la fertilité des sols et les performances des cultures. Nous hypothésions que ces combinaisons

légumineuses-céréales amélioreront la disponibilité du P et, par conséquent, la croissance des plantes et la productivité agricole, tout en minimisant la concurrence pour les ressources. Cette étude a testé les hypothèses selon lesquelles les cultures intercalaires améliorent la fertilité du sol, les performances des cultures et la durabilité agricole par rapport aux monocultures. Les résultats fourniront des preuves empiriques de cet impact positif et des informations pratiques pour optimiser les pratiques agricoles dans les sols pauvres en phosphore.

2. Matériels et méthodes

2.1. Site expérimental et conditions climatiques

L'étude s'est déroulée sur deux saisons de croissance, en 2018 et 2019, sur des parcelles expérimentales à Tissemsilt, dans le nord-ouest de l'Algérie (35°86.57'N, 1°99.13'E, 1220 m d'altitude). Les essais ont commencé fin décembre et se sont terminés fin juin pour les deux saisons. Le climat de cette région est marqué par un hiver froid et des précipitations irrégulières. Les précipitations annuelles moyennes étaient de 615 mm en 2018 et 350 mm en 2019. La température annuelle moyenne durant les deux saisons était de 19,7°C, avec des minima moyens de 12,8°C en janvier et des maxima moyens de 22,5°C en juillet et août. Les mois les plus froids ont été de décembre à février, avec des températures minimales de 5,2°C en janvier 2018 et 3,7°C en janvier 2019.

Les propriétés physicochimiques de la couche arable ont été évaluées avant le semis lors de la première saison de croissance. Des échantillons de sol ont été prélevés à une profondeur de 0 à 20 cm à l'aide d'une tarière, et analysés selon les méthodes décrites précédemment (chapitre II paragraphe 2.3). Les résultats ont montré que la proportion d'argile (42 %) était supérieure à celle du limon (33 %) et du sable (25 %). La couche arable avait un pH alcalin de 7,90, une teneur en CaCO₃ de 181 g kg⁻¹ et une faible teneur en matière organique (1,71 %). De plus, le site était caractérisé par une faible disponibilité en phosphore, avec une concentration de P Olsen de 7,52 mg P kg⁻¹.

2.2. Système de culture et dispositif expérimental des parcelles

L'expérience de terrain a été menée sur deux saisons de croissance avec un génotype de pois chiche (*Cicer arietinum* L. cv. Flip 93-93C) et une variété de blé dur (*Triticum durum* L. cv. Simeto), couramment cultivée en Algérie. Les cultures ont été réalisées en association et en monoculture, suivant un dispositif en blocs aléatoires, sur une surface de 150 m².

L'essai comprenait trois blocs, chacun divisé en trois parcelles : pois chiche en monoculture, blé dur en monoculture, et association blé dur-pois chiche, pour les deux génotypes. Les

densités de plantation respectaient les pratiques locales : 350 plantes/m² pour le blé dur en monoculture et 250 plantes/m² en association, avec un espacement de 25 cm entre les rangs ; 30 plantes/m² pour le pois chiche avec un espacement de 20 cm entre les plantes et de 25 cm entre les rangs, tant en monoculture qu'en association. Les deux espèces étaient semées dans la même rangée pour maximiser les interactions racinaires dans la rhizosphère.

La gestion des cultures s'est faite en conditions pluviales sans irrigation supplémentaire. Aucun engrais ni herbicide n'a été appliqué durant les deux saisons de croissance.



Figure III.1 : système d'association pois chiche-blé dur (photos originales prises en 2019)

2.3. Prélèvement d'échantillons de plantes et de sol et mesures

Au stade de la pleine floraison des deux génotypes de pois chiche (120 jours après semis), six plantes ont été récoltées au hasard pour chaque traitement au centre de chaque parcelle. Les parties aériennes ont été séparées des racines au niveau du collet, séchées pendant 48 heures à 65°C, puis pesées. Les nodules ont été séparés des racines, séchés et pesés indépendamment.



Figure III. 2 : prélèvement des échantillons des plantes au moment de la floraison de pois chiche pour les différentes pesées (photos originales prises en 2019)

À maturité complète (185 jours après semis pour le pois chiche et 195 jours après semis pour le blé dur), le rendement en grains a été mesuré en récoltant toutes les plantes dans une zone de 1 m², en excluant les rangées extérieures. Les grains ont été séchés à l'air et les rendements en grains calculés en g.m², puis convertis en quintaux par hectare (q.ha⁻¹).

Pour déterminer la quantité de phosphore (P) dans le sol rhizosphérique à la floraison, des échantillons de sol ont été prélevés autour des racines des deux espèces. Ces échantillons de sol ont été séchés à l'air, tamisés (2 mm) et stockés à 4°C pendant 2-3 jours jusqu'à l'analyse. La disponibilité du phosphore dans le sol a été déterminée par extraction au NaHCO₃ (Olsen et al., 1954), et la concentration totale de phosphore dans les plantes (parties aériennes et racinaires) a été mesurée selon la méthode AFNOR, 1969 (voir paragraphe 2.4.3. du chapitre II).

L'absorption de P par les plantes correspond à la quantité de nutriments absorbés par les plantes au cours de leur croissance et a été calculée comme suit :

$P \text{ absorbé} = (\text{concentration de P SDW} \times \text{SDW}) + (\text{concentration de P RDW} \times \text{RDW}) - \text{teneur en P des semences}$ (Lazali et al., 2021).

Après avoir déterminé la concentration du P dans les parties de la plante de pois chiche et blé dur, l'efficacité d'utilisation de P (EUP) est définie comme la biomasse totale sèche de la plante par unité de P absorbé, tandis que, l'efficacité d'absorption du P (EAP) est la relation entre P absorbé et le P disponible dans le sol qui reflète la capacité de la plante à extraire le P du sol (Lazali et al., 2017) selon les formules suivantes :

$$EUP = \frac{\text{Biomasse totale sèche}}{\text{P absorbé par la plante}}$$

$$EAP = \frac{\text{P absorbé par la plante}}{\text{P disponible dans le sol}}$$

2.4. Le ratio d'équivalence des surfaces

LER indique les avantages des systèmes de culture en association par rapport à la monoculture. Elle est calculée comme suit :

$$LER = \frac{Y_{ab}}{Y_{aa}} + \frac{Y_{ba}}{Y_{bb}}$$

Dont ; Y_{aa} est le paramètre de l'espèce « a » en monoculture, Y_{bb} est le paramètre de l'espèce « b » en monoculture, Y_{ab} est le paramètre de l'espèce « a » associé avec l'espèce « b » et le contraire pour Y_{ba} . LER a été déterminé pour la biomasse sèche, le rendement en grain et l'absorption en P.

2.5. Le ratio de compétitivité

Dans un système de culture intercalaire, le rapport de compétitivité (RC) indique la capacité compétitive des espèces composantes. Le RC exprime combien de fois une culture composante est plus compétitive que l'autre et représente la proportion des LER individuelles des cultures considérées en intercalaire. Il prend également en compte le ratio des cultures semées en mélange. Il a été calculé selon la formule suivante (Lithourgidis et al., 2011).

$$CRa = \frac{LERa}{LERb} \times \frac{Zba}{Zab}$$

$$CRb = \frac{LERb}{LERa} \times \frac{Zab}{Zba}$$

où CRa et CRb représentent les ratios de compétitivité des espèces cultivées "a" et "b", et LERa et LERb sont les ratios d'efficacité d'utilisation des ressources (LER) des espèces "a" et "b", respectivement. Zab est le ratio de semis de l'espèce "a" en mélange avec "b" et Zba est la proportion de semis de l'espèce "b" en mélange avec "a".

Si la valeur de CR est inférieure à 1 ($CR < 1$), cela indique un bénéfice positif et signifie qu'il y a une compétition limitée entre les cultures composantes, permettant ainsi leur culture en intercalaire. En revanche, si la valeur de CR est supérieure à 1 ($CR > 1$), cela a un impact négatif.

2.6. Analyse statistique des données

Les effets du système de culture et de la saison de croissance sur la biomasse des plantes, l'absorption du phosphore, la disponibilité du phosphore dans la rhizosphère et le rendement en grains ont été déterminés à l'aide d'une analyse de variance (ANOVA) avec un seuil de signification de $p = 0,05$. Le test de Tukey a été utilisé pour déterminer si la différence entre les valeurs moyennes pour chaque traitement était significative (Brahimi et al., 2022). Les analyses statistiques ont été réalisées avec le package stats du logiciel R version 2.15.1 développé par la R Foundation for Statistical Computing.

3. Résultats

3.1. Croissance des plantes, nodulation et rendement en grains

La nodulation du pois chiche qui est un indicateur clé de la capacité des légumineuses à fixer N₂ a varié selon les traitements de culture et les saisons de croissance (Figure III.3).

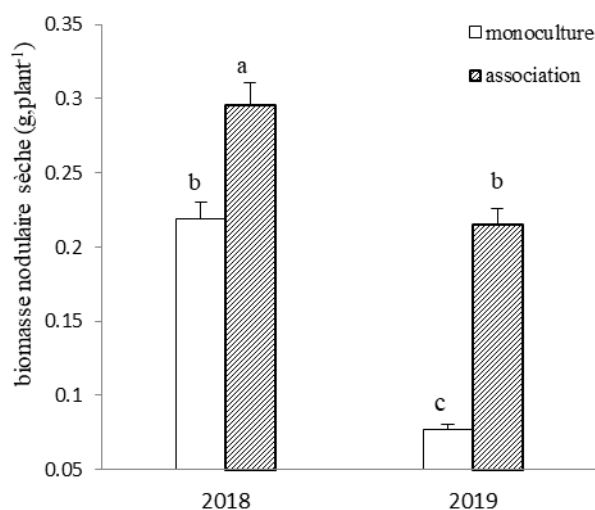


Figure III.3 : la biomasse nodulaire sèche du génotype de pois chiche cultivé en monoculture et en association durant deux saisons de croissance.

Les valeurs représentent la moyenne de six plants de pois chiche pour chaque parcelle \pm erreur standard. Les lettres a,b,c représentent les groupes homogène selon le test Tukey.

La croissance des nodules a augmenté de manière significative lorsque le pois chiche était cultivé en intercalaire, bien que cette augmentation ait été plus prononcée en 2019 (64%) par rapport à 2018 (26%). Cette variation observée en nodulation peut être attribuée aux différences dans les interactions symbiotiques et les conditions environnementales. En 2019, des conditions climatiques peut-être favorables ou une meilleure compatibilité entre les espèces cultivées en association ont pu contribuer à une augmentation plus marquée de la nodulation par rapport à 2018. La nodulation est, ce qui est crucial pour la fertilité du sol et la croissance des plantes dans les systèmes de culture à faibles intrants.

La Figure III.4 montre l'effet de la culture intercalaire sur la biomasse aérienne et racinaire des deux espèces au cours des deux saisons de croissance. Les différences observées dans la biomasse aérienne et racinaire entre les cultures intercalaires et les cultures pures révèlent les interactions complexes entre les plantes cultivées ensemble.

Pour le pois chiche, le poids sec de la partie aérienne était inférieur dans les cultures intercalaires (3,05 g plant⁻¹) que dans les cultures pures (3,61 g.plant⁻¹) sur les deux saisons, mais cette

réduction n'était pas statistiquement significative en 2018, suggérant que les interactions spécifiques pouvaient avoir atténué l'effet négatif de la compétition. En revanche, le poids sec de la partie aérienne du blé dur a augmenté de manière significative de 32 % en 2019 et de 27 % en 2018 lorsqu'il était cultivé en intercalaire (Figure III.4 a) ce qui démontre une meilleure utilisation des ressources ou des interactions bénéfiques entre les deux espèces, particulièrement en 2019.

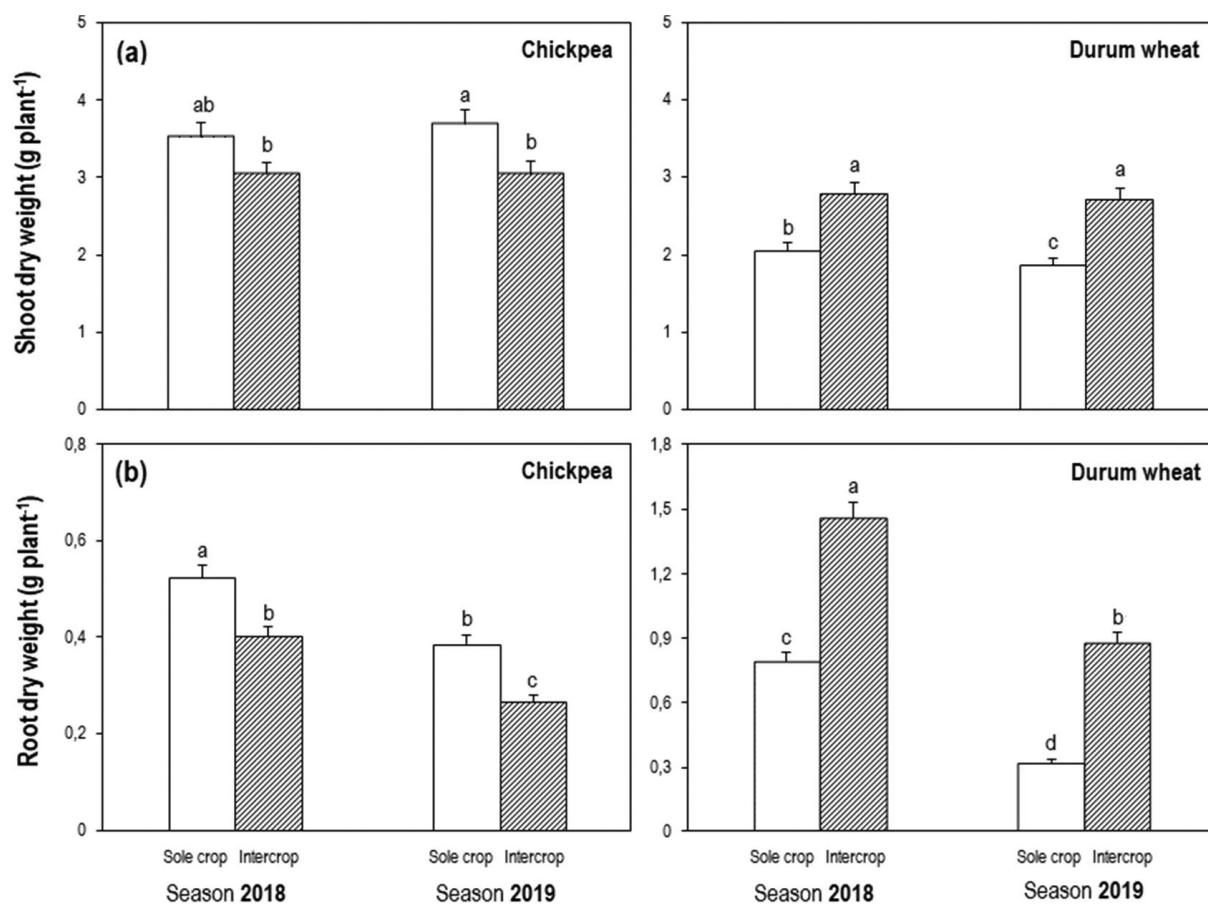


Figure III.4 : la biomasse aérienne et racinaire sèche de pois chiche et le blé dur cultivés en monocultures et en association durant deux saisons de croissance.

Les valeurs représentent la moyenne de six plants pour chaque parcelle \pm erreurs standard. Les lettres a,b,c,d représentent les groupes homogène selon le test Tukey.

En ce qui concerne la croissance racinaire (Figure III.4 b), elle a augmenté de manière significative dans les cultures intercalaires par rapport aux cultures pures, uniquement pour le blé dur. Cependant, cette augmentation était plus importante en 2019 (64 %) par rapport à 2018 (46 %) indiquant une adaptation racinaire potentiellement améliorée, permettant une meilleure exploration du sol et une absorption plus efficace des nutriments. Cette augmentation de la biomasse racinaire peut également favoriser une meilleure stabilité des plantes et une résilience accrue aux stress abiotiques.

Le rendement en grains des deux cultures a montré une réponse différente entre les deux espèces et également été affecté par les systèmes de culture et les saisons de croissance (Figure III.5). En effet, le rendement en grains du blé dur était significativement plus élevé en culture intercalaire (9 % en 2018 et 15 % en 2019) ce qui pourrait être attribué à une utilisation plus efficace des ressources et à des interactions positives avec le pois chiche, tandis qu'il était significativement plus faible pour le pois chiche intercalaire au cours des deux saisons indiquant une compétition pour les ressources ou une allocation des ressources plus favorable à la croissance végétative plutôt qu'à la production de grains. Ces résultats soulignent l'importance de considérer les interactions spécifiques et les conditions environnementales lors de la conception de systèmes de culture intercalaires, afin d'optimiser la productivité et la durabilité des cultures.

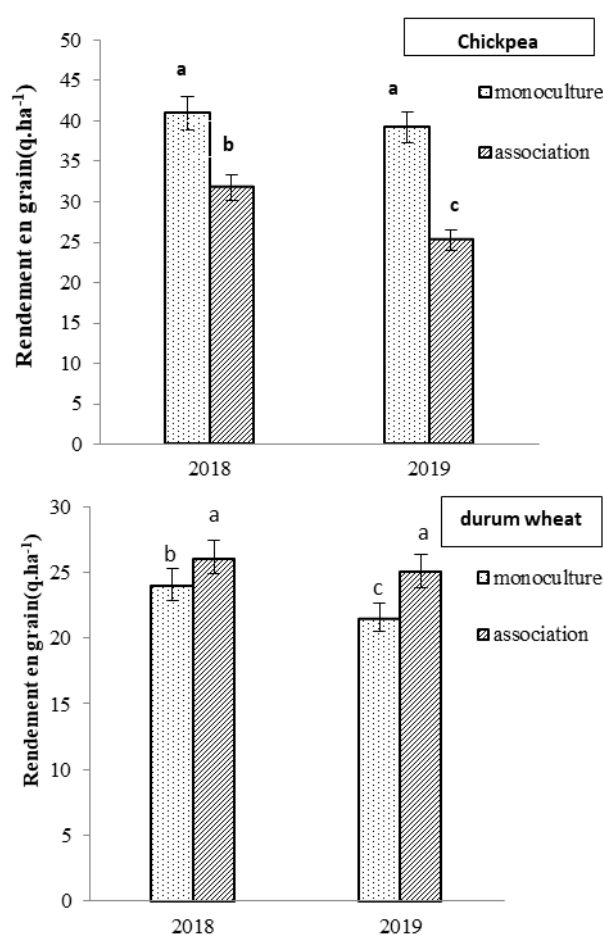


Figure III.5 : le rendement en grain (q. ha⁻¹) de pois chiche et le blé dur cultivés en monocultures et en association durant deux saisons de croissance.

Les valeurs représentent la moyenne de six plants pour chaque parcelle ± erreurs standard. Les lettres a,b,c représentent les groupes homogène selon le test Tukey.

3.2. Concentration et absorption du phosphore par la plante

La concentration de P dans la partie aérienne et racinaire et leur absorption par le blé dur et le pois chiche cultivés en cultures intercalaires et monocultures sont indiquées dans le tableau III.1. Pour le pois chiche, l'association a significativement diminué la concentration et l'absorption de P au cours des deux saisons de croissance (tableau III.1). En revanche, la concentration du P dans la partie aérienne du blé dur a augmenté de manière significative lorsqu'il a été cultivé en association, bien que cette augmentation ait été plus importante en 2019 (23 %) qu'en 2018 (16 %). Ainsi une augmentation significativement positive a été observée pour le blé dur associé avec 16 % et 13 % de concentration de P dans la partie racinaire en 2018 et 2019, respectivement. De même, l'absorption de P chez le blé dur associé avec le pois chiche a été augmentée de 43 % et 50 % en 2018 et 2019, respectivement.

Tableau III.1: concentration du phosphore dans la partie aérienne et racinaire et P absorbé par le blé dur et le pois chiche cultivés en association et en monoculture.

concentration et absorption du phosphore							
pois chiche					blé dur		
saisons de croissance	type de culture	concentration du P en parties aérienne (mg.g ⁻¹)	concentration du P en racines (mg.g ⁻¹)	P absorbé (mg.plant ⁻¹)	concentration du P en parties aérienne (mg.g ⁻¹)	concentration du P en racines (mg.g ⁻¹)	P absorbé (mg.plant ⁻¹)
2018	monoculture	6.28±0.2 a	7.87±0.12 c	0.26±0.01 a	6.59±0.2 a	4.93±0.1 a	0.17±0.04 a
	association	5.29±0.05 b	6.87±0.14 a	0.18±0.02 a	7.86±0.05 b	5.80±0.07 b	0.30±0.01 b
2019	monoculture	5.98±0.1 a	7.12±0.09 a	0.24±0.01 a	6.17±0.1 a	5.12±0.1 a	0.13±0.03 a
	association	5.16±0.05 b	6.33±0.12 b	0.17±0.02 a	7.92±0.05 b	5.93±0.05 b	0.26±0.01 b
p values							
type de culture(TC)		0.013	0.0022	0.07	0.022	0.015	0.015
Saisons (S)		0.12	0.08	0.53	0.32	0.22	0.09
TC * S		0.46	0.39	0.98	0.28	0.83	0.64
les valeurs représentent la moyenne de 3 répétitions±ES (erreur standard), les lettres signifient les groupes homogènes à p<0.05							

3.3. Disponibilité du phosphore dans la rhizosphère

La figure III.6 montre les valeurs de concentration en Olsen-P mesurées dans le sol témoin sans plante (c'est-à-dire le sol bulk) et dans la rhizosphère des deux espèces cultivées soit en culture unique soit en association. La concentration en Olsen-P dans la rhizosphère du pois chiche, tant pour l'association que pour la culture pure, était plus élevée que dans le sol bulk, et cet effet était plus marqué dans la culture intercalaire que dans la monoculture. Cet effet était plus prononcé en 2019 (23 %) qu'en 2018 (11 %). De même, le blé dur a augmenté de manière significative sa concentration en Olsen-P dans la rhizosphère lorsqu'il était cultivé en tant que

culture unique (uniquement en 2019) et en association avec du pois chiche, par rapport au sol bulk.

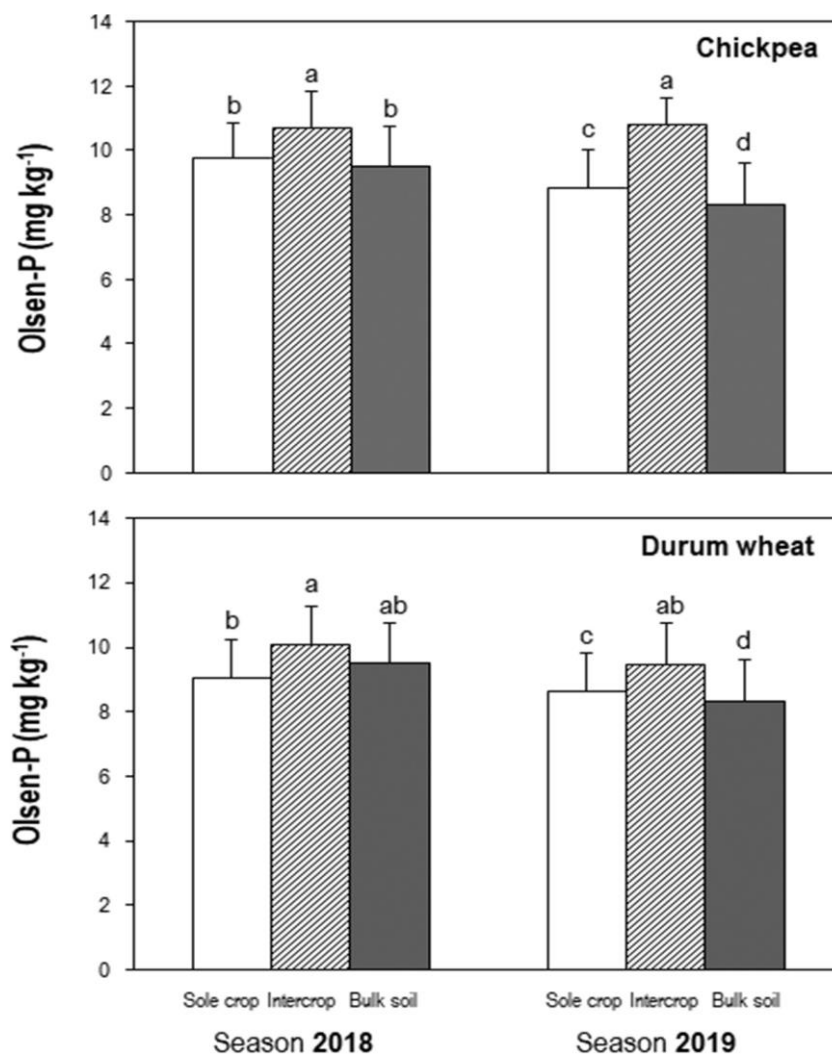


Figure III.6 : Concentration d'Olsen-P dans la rhizosphère du pois chiche et du blé dur cultivés en monoculture et en association au cours des deux saisons de croissance 2018 et 2019.

Les valeurs ont été comparées au sol bulk correspondant au sol témoin sans plante. Le sol bulk était le même pour les deux espèces au cours de chaque saison de croissance. Les valeurs représentent la moyenne de six répétitions \pm erreurs standard.

3.4. Efficacité d'utilisation et d'absorption du phosphore EUP/EAP

Les données du tableau III.2 montrent que le système de culture a influencé de manière significative l'efficacité d'utilisation et d'absorption du P pour les deux espèces cultivées en monoculture et en association.

Pour le pois chiche, l'efficacité d'utilisation du P (EUP) était significativement plus élevée en association qu'en monoculture sur deux saisons de croissance (19,5 en 2018 et 21,3 en 2019). En revanche, le blé dur a augmenté son EUP lorsqu'il était cultivé en monoculture. Cette

augmentation a été plus importante en 2019 (29 %) qu'en 2018 (15 %). Dans le cas de EAP, ce caractère a diminué de manière significative chez le pois chiche en association, alors qu'il a augmenté de 39 % et 50 % en 2018 et 2019, respectivement, pour le blé dur cultivé en association.

Tableau III.2 : Efficacité d'utilisation et d'absorption du phosphore (EUP/EAP) pour le pois chiche et le blé dur cultivés en monoculture et en association pendant deux saisons de croissance en 2018 et 2019.

les paramètres d'efficience d'utilisation du phosphore					
		Pois chiche		Blé dur	
saison de croissance	type de culture (TC)	EUP (g TDW.mg P uptake ⁻¹)	EAP (mg P uptake. Mg P Olsen ⁻¹)	EUP (g TDW.mg P uptake ⁻¹)	EAP (mg P uptake. Mg P Olsen ⁻¹)
2018	monoculture	15,26±0,22a	0,027±0,001a	16,33±0,2b	0,019±0,002a
	association	19,46±0,5b	0,018±0,003b	13,95±0,2a	0,031±0,003b
2019	monoculture	16,74±0,3a	0,025±0,002a	17,60±0,3b	0,014±0,001a
	association	21,32±0,4b	0,017±0,001b	12,44±0,4a	0,028±0,002b
P values TC		.000	.004	.005	.000
CV% Saison	2018	10.12%	28.02%	9.61%	3.01%
	2019	11.18%	25.26%	11.59%	3.65%
CV% TC	monoculture	3.30%	16.79%	3.99%	17.40%
	association	4.09%	18.25%	2.53%	15.79%
Valeurs représentent la moyenne de 3 répétitions ± SE (Standard Error), différent lettres signifient les groupes homogènes à p<0.05					

3.5. Rapport d'équivalence en terre (LER) et rapport de compétitivité (CR)

Dans cette étude, le rapport d'équivalence terre (LER) pour tous les paramètres testés (la biomasse totale de la plante, rendement en grains et absorption de P) était supérieur à 1 (tableau III.3), ce qui indique un avantage de la culture intercalaire par rapport à la monoculture. Le LER a varié entre les saisons de croissance, il était plus élevé en 2018 (pour le rendement en grains) et en 2019 (pour l'absorption de P) (tableau III.3 partie LER).

Aussi le tableau III. 3 indique tous les ratios de compétitivité pour le poids total, le rendement en grains et l'absorption de P de chaque espèce. Au cours des deux saisons, le blé dur a été plus compétitif que le pois chiche pour tous les paramètres testés, leur compétitivité étant plus prononcée pour l'absorption de P (CR = 2,44 en 2018 et CR = 2,99 en 2019) (voir tableau III.3 partie CR).

Tableau III.3 : Rapport d'équivalence en terre (LER) et rapport de compétitivité (CR) pour le rendement, la biomasse sèche totale et le phosphore absorbé au cours des deux saisons de croissance 2018 et 2019.

les indices de compétition									
seasons	LER (land equivalent ratio)			CR (Competitive ratio)					
				pois chiche			blé dur		
	Total DW	Rendement	P absorbé	Total DW	rendement	P absorbé	Total DW	rendement	P absorbé
2018	2.384±0.06a	1.981±0.143a	2.484±0.04b	0.605±0.11a	0.729±0.108a	0.428±0.06a	1.773±0.34b	1.431± 0.20b	2.442 ±0.34b
2019	2.49±0.09a	1.80±0.07b	2.73±0.1a	0.51±0.05a	0.558±0.06b	0.343±0.03a	1.996±0.241a	1.849 ±0.23a	2.998 ± 0.378a
P value									
season	0.47	0.047	0.046	0.3407	0.0397	0.206	0.0296	0.0398	0.0136
Replicate	0.56	0.86	0.167	0.178	0.769	0.179	0.07	0.786	0.100
les valeurs représentent la moyennede 3 répétitions ± SE (Standard error), la probabilité est limité à p <0.05									

4. Discussion

La plupart des résultats rapportés dans cette étude de terrain sont considérés comme les premiers résultats originaux sur l'évaluation agro-écologique du système de culture intercalaire pois chiche-blé dur dans des conditions de sol à faible teneur en phosphore, à l'aide d'indices calculés. Les résultats de la présente étude sont en accord avec de nombreuses études indiquant que la culture intercalaire de légumineuses avec des céréales augmente les rendements et améliore l'efficacité de l'utilisation des ressources environnementales en stimulant la croissance des plantes et le rendement par rapport à leurs systèmes de culture uniques.

Dans la présente étude, la biomasse des nodules était significativement plus élevée pour le pois chiche lorsqu'il était cultivé en association avec du blé dur (figure III.1), ce qui suggère une plus grande efficacité dans l'utilisation des ressources du sol. Plusieurs études ont abordé l'effet de la culture intercalaire sur l'augmentation de la croissance des nodules en cas de carence en P (Brahimi et al., 2022 ; Latati et al., 2016). Banik et al. (2006) ont rapporté un effet similaire de la culture intercalaire sur la fixation de N₂ et la croissance des nodules, et ont constaté que la biomasse des nodules était plus élevée pour la culture intercalaire en raison d'une association bénéfique entre les céréales et les légumineuses. Dans ce travail, l'augmentation significative observée de la biomasse aérienne et racinaire (Figure III.2) pour le blé dur en culture intercalaire dans des sols à faible teneur en phosphore est une preuve d'interactions positives (facilitation, complémentarité, etc.) avec le pois chiche.

Dans une littérature récente, la facilitation de la croissance des céréales par les légumineuses en culture intercalaire a été signalée comme l'un des facteurs conduisant à une utilisation accrue

des ressources complémentaires, qui est l'un des principaux mécanismes physiologiques à l'origine de l'efficacité de l'utilisation du P en cas de carence en P (Lazali et al., 2021 ; Messaoudi et al., 2020). Ces améliorations qui sont probablement dues à une plus grande capacité des légumineuses à augmenter la fixation de N₂ peuvent offrir des opportunités pour maximiser et de maintenir une croissance végétale accrue pour les espèces cultivées en association (Hauggaard-Nielsen et al., 2009). Les données obtenues dans cette étude sont également similaires aux résultats précédents où la carence en P peut affecter la croissance des légumineuses associées et, par la suite, leur fonction de fixation symbiotique de l'azote (Kaci et al., 2018 ; Lazali et al., 2016).

Au cours de 10 années d'expérimentation sur le terrain dans des conditions de culture intercalaire, Wang et al. (2014) ont constaté une augmentation significative du rapport de la biomasse totale de la féverole en culture intercalaire avec le maïs. Ces améliorations bénéfiques sont dues à une plus grande capacité des légumineuses à augmenter ces activités de fixation et peuvent offrir des opportunités pour maximiser et maintenir la croissance des plantes intercalaires (Jensen, Carlsson et Hauggaard-Nielsen, 2020). Les légumineuses, qui peuvent s'adapter à différents modèles de culture et qui peuvent fixer l'azote atmosphérique, peuvent contribuer à maintenir une biomasse végétale et un rendement céréalière accrues pour les espèces avec lesquelles elles sont cultivées (Messaoudi et al., 2020). Cette augmentation de la biomasse résulte principalement de la facilitation interspécifique de l'utilisation des nutriments entre le blé dur et le pois chiche qui a été observée pendant la première saison de croissance. Des études récentes ont confirmé les avantages de la culture intercalaire pour les céréales grâce aux mécanismes de facilitation créés par une légumineuse intercalaire, qui a été responsable de l'augmentation du P inorganique par l'acidification de la rhizosphère pendant la fixation de N₂ (Hinsinger et al., 2011).

Dans la présente étude, l'augmentation du rendement en grains pour les cultures intercalaires (Figure III.3) peut être une conséquence de l'augmentation observée de l'absorption des nutriments et de la biomasse végétale en raison de l'augmentation de la disponibilité du P dans la rhizosphère. En effet, la culture intercalaire a eu un effet positif et significatif sur le rendement total en grains, comme l'atteste le LER plus élevé que celui obtenu en culture unique (tableau III.3). De même, le rendement en grains du blé dur a augmenté en cas de culture intercalaire avec la féverole (Zhang et Li, 2003).

Dans ce contexte, l'estimation de la productivité de la terre à l'aide des paramètres du LER dans les cultures intercalaires (céréales-légumineuses) indique que la biomasse et le rendement des céréales sont probablement meilleurs que ceux d'une culture unique en raison d'une meilleure

utilisation des ressources (Chen et al., 2017 ; Latati et al., 2016). Le LER augmente avec la diminution des niveaux d'azote dans le sol, ce qui suggère une meilleure performance des systèmes de culture intercalaire à base de légumineuses dans les sols pauvres dans les sols pauvres (Kermah et al., 2018). Le LER élevé des cultures intercalaires suggère qu'il ne s'agit pas seulement un mode d'agriculture traditionnel dans le passé, mais aussi une pratique prometteuse qui pourrait améliorer la productivité des terres et diminuer les impacts environnementaux des déversements d'engrais N dans le monde à l'avenir.

Dans ce travail, la culture intercalaire a semblé influencer positivement l'absorption et l'efficacité d'utilisation des nutriments (tableaux III.1 et 2), en particulier pour le blé dur en association, dont l'amélioration de la culture aérienne a probablement été stimulée par les performances de la culture souterraine de légumineuses. Différents chercheurs ont fait état d'une meilleure absorption de P dans un système de culture intercalaire varié où la légumineuse était considérée comme un composant, par exemple, pois d'Angole et de sorgho en association et lupin et de blé en association aussi (Maitra et al., 2021). En outre, de faibles niveaux de P dans les sols peuvent manifestement améliorer la facilitation des cultures intercalaires de blé dur et de pois chiche en raison d'une meilleure absorption et utilisation du P (Li et al., 2007). Les effets bénéfiques de la culture intercalaire de légumineuses et de céréales sur la disponibilité et l'absorption des nutriments ont été largement documentés, principalement dans le cas du P.

Ainsi, l'association de pois d'Angole avec le maïs, le contact physique avec la rhizosphère et leurs activités biochimiques peuvent avoir un impact positif et significatif sur la structure du sol ainsi que sur le stockage des nutriments dans ces sols à forte absorption de P (Garland et al., 2017). Par conséquent, il y a eu une augmentation significative du stockage de P organique dans les micros agrégats des cultures intercalaires par rapport au maïs unique (84 vs. 29 mg P kg⁻¹, respectivement) (Garland et al., 2017). L'azote biologiquement fixé est passé de 89 % dans le pois d'Angole cultivé seul à 96 % dans le système d'association (Garland et al., 2017). En outre, la culture intercalaire niébé-maïs a amélioré la disponibilité en P du sol et les rendements de maïs dans les sols alcalins (Latati et al., 2016).

Sous déficience en P, dans un système d'association comme le soja-le blé, cette combinaison de cultures stimule la diversité microbienne des racines, l'allocation de la biomasse racinaire et l'activité de la phosphatase acide hydrolysant le P dans les racines. Par conséquent, l'augmentation de la diversité microbienne et les changements morphologiques et biochimiques induits par les racines contribuent à améliorer l'acquisition de P et de N (Bargaz et al., 2017). Selon Brahim et al. (2022), la disponibilité accrue de P dans la rhizosphère était plus importante lorsque les deux espèces étaient cultivées en association que lorsqu'elles étaient cultivées en

monoculture. Cette augmentation pourrait être une conséquence de l'alcalinisation induite par les racines ainsi que d'autres processus, par exemple l'exsudation de phosphatases et de carboxylates. Parallèlement, dans le sol rhizosphérique de l'orge associé avec féverole, une augmentation de la teneur en P disponible a été confirmée et a coïncidé avec une augmentation de l'activité des phosphatases acides (Mouradi et al., 2018).

L'augmentation de la disponibilité en P dans la rhizosphère du blé dur en culture intercalaire (figure III.4) peut s'expliquer par l'acidification de la rhizosphère du pois chiche (Lazali et Bargaz, 2017). Dans les sols à faible teneur en P, l'acidification de la rhizosphère pourrait contribuer à l'augmentation de la disponibilité en P pour les légumineuses telles que les haricots communs (Lazali et Drevon, 2021) et peut être liée à une absorption plus importante de cations que d'anions (Lazali et Bargaz, 2017). Aussi, Les interactions racinaires ont également un impact profond sur l'absorption de P et le rendement dans le système blé dur-pois chiche, l'acidification de la rhizosphère causée par le pois chiche augmentant la mobilisation des sources de P organiques/inorganiques et facilitant l'absorption de P par le blé cible (Messaoudi et al., 2020). Dans les sols, les microorganismes jouent un rôle important dans la mobilisation du P peu disponible et l'augmentation subséquente de la quantité de P disponible pour l'acquisition par les plantes, soit par la solubilisation des pools de P inorganique, soit par l'hydrolyse enzymatique des pools de P organique (Tang et al., 2014). Les avantages des cultures intercalaires de céréales et de légumineuses pour l'absorption du P dépendent de la combinaison des espèces (He et al., 2013) et de la disponibilité du P dans le sol (Namatsheve et al., 2020).

5. Conclusion

Cette étude a démontré que la culture intercalaire de légumineuses et de céréales dans des sols à faible teneur en phosphore améliorerait la disponibilité du P. Les résultats ont montré une augmentation de l'efficacité de l'utilisation du P et une amélioration de la croissance des plantes, validant l'hypothèse selon laquelle la culture intercalaire améliore la disponibilité du P et favorise par la suite la productivité agricole. Ensuite, les résultats ont indiqué que l'utilisation complémentaire des nutriments entre les légumineuses et les céréales dans le système d'association a effectivement minimisé la concurrence entre les ressources. Les effets positifs observés sur le rendement des cultures en témoignent, ce qui confirme l'hypothèse selon laquelle les cultures intercalaires peuvent atténuer la concurrence entre les ressources et améliorer le rendement des cultures par rapport à la monoculture. Les effets positifs de la disponibilité du phosphore, de l'efficacité de l'utilisation des nutriments et de l'amélioration du

rendement indiquent le potentiel de la culture intercalaire en tant que pratique agroécologique intensifiée qui offre une fertilité du sol supérieure et une meilleure performance des cultures par rapport aux pratiques de culture unique. Cette étude fournit des indications précieuses pour la conception de systèmes de cultures intercalaires optimisés, productifs, efficaces en termes d'utilisation du P et des ressources en eau, et qui soutiennent des pratiques agricoles durables.

*Test multilocal d'association céréales légumineuses dans
l'agroécosystème algérien*

Chapitre IV

Test multilocal d'association céréales légumineuses dans l'agroécosystème algérien

1. Introduction

L'expansion des systèmes de production agricole intensive entraîne de nombreux problèmes, notamment la réduction de la biodiversité, l'insécurité du rendement de la biomasse et la contamination de l'environnement due à une application généreuse d'engrais et de pesticides synthétiques (Wang et al., 2020). Les impacts négatifs de ces méthodes agricoles sur les agroécosystèmes suggèrent des méthodes alternatives qui améliorent l'efficacité et la durabilité ainsi qu'une productivité élevée. Pour maintenir la durabilité des écosystèmes agricoles, ces systèmes agricoles doivent rester rentables et respectueux de l'environnement avec une production et une valeur économique élevées (people et al., 2009a). La disponibilité et l'absorption des nutriments sont des facteurs limitants critiques pour la croissance et le rendement des cultures dans les agroécosystèmes à faibles intrants (Cong et al., 2014). Avec la demande mondiale croissante de produits agricoles et alimentaires, le développement de nouvelles stratégies agricoles durables pour exploiter efficacement les ressources du sol (en particulier le phosphore et l'azote) est devenu une priorité intéressante. Certaines études ont démontré que les cultures intercalaires sont une stratégie qui permet d'obtenir un rendement élevé avec une bonne qualité (Belel et al., 2014). La culture intercalaire est définie comme la culture simultanée de plus d'une culture dans la même zone et au même moment (Zhang et al., 2020). Son importance repose sur l'obtention de rendements plus élevés, l'amélioration de l'efficacité de l'utilisation des ressources, l'amélioration de la conservation des sols et le contrôle des mauvaises herbes, les insectes et les maladies par rapport à la monoculture (Madembo et al., 2020). L'une des pratiques durables de diversification des espèces est la réintroduction de légumineuses fixatrices de N₂ dans les systèmes de culture. Les légumineuses sont connues pour fournir de multiples services écosystémiques (Brooker et al., 2014). Les légumineuses sont traditionnellement utilisées en rotation et en association avec d'autres cultures (notamment les céréales). Les principaux avantages des légumineuses comprennent la fixation biologique de l'azote atmosphérique grâce à une relation symbiotique avec les bactéries du sol collectivement appelées rhizobia (Peoples et al., 2009b ; Jensen et al., 2010). De plus, les légumineuses jouent un rôle important dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre (Jensen et al., 2011 ; Jeuffroy et al., 2013), non seulement en raison de leur capacité à

fixer le N₂ qui remplacerait les engrais à base d'énergie fossile mais aussi à séquestrer le carbone. et la production de biomasse (Jensen et al., 2011). En effet, les légumineuses ont un grand potentiel pour diversifier les systèmes agricoles afin de restaurer la biodiversité associée dans les agroécosystèmes, et servent de cultures intermédiaires qui contribuent à réduire les mauvaises herbes, les ravageurs et les maladies associées aux rotations courtes (Voisin et al., 2013). Les cultures intercalaires de céréales-légumineuses peuvent permettre des rendements plus élevés (Bedoussac et al., 2015), améliorer l'efficacité de l'utilisation des nutriments et de l'eau (Bargaz et al. 2017) et augmenter la disponibilité des nutriments (Blesh, 2017). Cependant, la croissance des légumineuses est sensible à la carence en phosphore P, particulièrement grave dans les sols calcaires (Lazali et al., 2018). La carence en phosphore P est le principal facteur limitant contrôlant la production de légumineuses (Drevon et al., 2015 ; Lazali et al., 2016a), car la disponibilité du P contrôle fortement la fixation du N₂ (Lazali et al., 2017). De plus, les cultures intercalaires ont le potentiel de donner des rendements plus élevés que les cultures uniques, une plus grande stabilité des rendements et une utilisation efficace des nutriments (Seran et Brintha, 2010 ; Belel et al., 2014). De même, un meilleur contrôle des mauvaises herbes, une amélioration de la qualité par variété alors que les cultures céréalières nécessitent une plus grande superficie pour produire le même rendement que les céréales dans un système de cultures intercalaires (Ijoyah, 2012 ; Belel et al., 2014). Pour mieux comprendre comment les cultures mixtes atténuent les conditions de stress, cette étude vise à mettre en évidence l'effet bénéfique de la culture intercalaire légumineuses-céréales dans l'amélioration de la disponibilité du sol en P pour la croissance et la productivité des plantes dans un sol déficient en P et un autre peu suffisant en P d'un agroécosystème du nord de l'Algérie.

2. Matériel et méthodes

2.1. Sites expérimentaux et zone d'étude

L'étude a été réalisée au cours des deux saisons de croissance 2018-2019, dans des conditions de terrain. Elle est basée essentiellement sur des expériences de cultures en association légumineuses-céréales dans deux sites différents nommés S1 et S2 dans la région de Theniet El Had (Tissemsilt) située dans le nord d'Algérie durant dans deux campagnes agricoles (2018/2019). Ces deux sites expérimentaux ont été choisis comme des sols suffisant et déficit en phosphore respectivement (**P = 17.8 mg P kg⁻¹ en S1 et P= 7.52 mg P kg⁻¹ en S2, Tableau IV.1**) afin de comparer l'adaptation de la symbiose rhizobienne des légumineuses à la

déficience en phosphore avec la suffisance en phosphore dans les systèmes céréaliers en terme d'association.

En plus, Les sites expérimentaux étaient situés à Tissemsilt, (nord-ouest d'Alger) (35°89.00' N, 1°92.03' E, 1185m pour S1 et 35°86,57'N, 1°99,13'E, 1220 m pour S2). Les deux sites se caractérisent par un climat méditerranéen à des hivers froids et des étés secs. La région connaît des précipitations irrégulières avec une moyenne annuelle de 615 mm en 2018 et 350 mm en 2019. Au cours de l'expérience de deux ans, la période la plus froide s'est étendue de décembre à février, avec des températures minimales enregistrées respectivement de 5,2 et 3,7 °C en janvier.



Figure IV.1 : les deux sites expérimentaux choisis (photos originales en 2018)

Afin de caractériser les sols des sites expérimentaux en tenant compte de la variabilité pédologique, les propriétés physico-chimiques déterminant le degré de fertilité du sol ont été mesurées sur chaque site selon les méthodes mentionnés dans le chapitre II. Ces propriétés sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau IV.1 : les propriétés physico-chimiques des sols des deux sites expérimentaux choisis représentés par une moyenne de deux répétitions \pm erreur standard

Sites	argile (%)	limon (%)	sable (%)	pH	N (g kg ⁻¹)	MO (%)	TOTAL -P (Olsen mg kg ⁻¹)
S1	38.9 \pm 0.01	35.1 \pm 0.2	25.2 \pm 0.3	7.7 \pm 0.05	1.32 \pm 0.06	4.25	17.8 \pm 0.2
S2	42 \pm 0.2	33 \pm 0.1	25 \pm 0.1	7.90 \pm 0.06	1.08 \pm 0.08	1.71	7.52 \pm 0.4

2.2. Le matériel végétal utilisé et les conditions de croissance

L'étude est basée sur l'adaptation de sept génotypes de pois chiche à savoir (FLIP 90-13C, FLIP 93-93C, FLIP 01-29C, FLIP 84-92C, FLIP 97-677C, FLIP 88-85C, ILC 32-79) en monoculture et en association avec le blé dur variété SIMETO cultivés dans l'agroécosystème de la wilaya de Tissemsilt en Algérie. Semis dans les deux sites expérimentaux (S1 et S2) durant deux saisons successives 2018/2019. Le plan expérimental utilisé dans chaque site est un split-plot avec deux variables (variétés et type de culture) avec trois répétitions pour les deux sites y compris les variables suivantes ; pois chiche en cultures pures répétés 3 fois, blé dur répétés 3 fois et pois chiche associé avec le blé dur (chaque génotype associé le blé dur) répétés aussi 3 fois à savoir que la microparcelle est en 1 m². La surface totale du site S1 est environ de 120 m² répartis en trois blocs dont chacun est divisé en deux sous blocs contenant les génotypes de pois chiche en culture pure ou en association avec le blé alors que la surface de site S2 était environ de 150 m² répartis en trois blocs dont chacun est divisé en deux sous blocs contenant aussi les génotypes de pois chiche pure ou en association.

Le protocole expérimental de l'essai : association pois chiche-blé dur plein-champ

Date de semis : 15-01-2019

Site de l'essai : région de EL MEDDAD Theniet El Had. Tissemsilt

	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
1m	ILC 32-79C.	GHAB 04	FLIP 01-29	FLIP 97-677 Blé dur	Ghab 05 Blé dur	Flip 90-13 Blé dur	Blé dur Culture pur
	GHAB 05	FLIP 90-13	ILC 32-79	FLIP 84-92 Blé dur	Flip 01-29 Blé dur	Ghab 04 Blé dur	
	FLIP 97-677	FLIP 01-29	FLIP 84-92	GHAB 04 Blé dur	Flip 90-13 Blé dur	ILC 32-79 Blé dur	Blé dur Culture pur
	FLIP 90-13 c.	GHAB 05	GHAB 04	ILC 32-79 Blé dur	Flip 97-677 Blé dur	Flip 84-92 Blé dur	
	FLIP 84-92 C.	ILC 32-79	FLIP 97-677	Flip 01-29 Blé dur	Ghab 04 Blé dur	Ghab 05 Blé dur	Blé dur Culture pur
	GHAB 04	FLIP 97-677	GHAB 05	Flip 90-13 Blé dur	Flip 84-92 Blé dur	Flip 01-29 Blé dur	
	FLIP 01-29 C.	FLIP 84-92	FLIP 90-13	Ghab 05 Blé dur	ILC 32-79 Blé dur	Flip 97-677 Blé dur	

Le protocole expérimental de l'essai 02. : association pois chiche-blé dur plein-champ

Date de semis : 15-02-2019

Site de l'essai : région d'ABADINE près d'El Hassania. Ain defla

Ilc 32/79 c pure	Flip 01/29 /blé	Ghab 04 pure	Flip 84/92 / blé	Blé dur culture pure
Flip 97/677 pure	Ghab 05/blé	Flip 90/13 pure	Flip 01/29 /blé	
Flip 01/29 pure	Flip 84/92 / blé	Flip 84/92 pure	Ghab 05 /blé	
Flip 90/13 pure	Flip 97/677 /blé	Flip 01/29 pure	Ilc 32/79 /blé	
Flip 84/92 pure	Ghab 04/blé	Ghab 05 pure	Flip 97/677 /blé	
Ghab 04 pure	Flip 90/13 /blé	Ilc 32/79 pure	Ghab 04/blé	
Ghab 05 pure	Ilc 32/79 /blé	Flip 97/677 pure	Flip 90/13 /blé	

La densité de semis en culture pure était environ 23 plants pour chaque microparcelles dans les deux sites tandis qu'elle est divisée entre le pois chiche et le blé dur en culture associé à savoir 50 :50. Le semis a été fait en même jour pour la culture pure ou en association pour S1 et S2. L'entretien des cultures était traditionnel et aucun apport d'engrais n'est ajouté.

Afin de connaître le degré de l'adaptation de pois chiche à la suffisance et déficience en phosphore en monoculture et en association avec le blé, l'efficacité d'utilisation de la symbiose rhizobienne a été calculée au moment de la floraison. Ainsi le rendement en grain a été établi en culture pure et en association des deux espèces cultivées.

L'expérimentation sur le terrain a été réalisée avec sept génotypes de pois chiche cultivés à la fois en association et en monoculture.

2.3. Echantillonnage des plants au moment de la floraison

2.3.1. Mesures de la biomasse aérienne, racinaire et nodulaire

Au moment de la floraison de pois chiche (environ 40 jours après semis pour S1 et 60 jours pour S2) cinq plants pois chiche ont été pris comme échantillons pour chaque microparcelle monoculture dans les deux sites et cinq plants pois chiche et blé dur pour chaque microparcelle associée dans les deux sites afin de calculer les paramètres de croissance et nodulation. Une séparation de la partie aérienne et la partie racinaire au niveau du collet des échantillons récoltés des deux espèces (pois chiche pure, pois chiche associé, blé dur associé) au moment de la floraison du pois chiche puis séchés durant 48 h à 70°C et pesés par la suite.

Pour les génotypes de pois chiche cultivés en monoculture et en association, les nodules ont été séparés de la partie racinaire, comptés et séchés 48 h à 70°C et aussi pesés. La biomasse aérienne

et nodulaire sèche des géotypes de pois chiche en monoculture et en association est utilisée pour calculer l'efficacité d'utilisation de la symbiose rhizobienne (EURS) par l'analyse de la corrélation afin d'estimer le degré d'adaptation des géotypes de pois chiche à la suffisance et la déficience en P en monoculture et en association dans deux sites différents et durant deux saisons successives (2018/2019). La biomasse aérienne et racinaire sèche des deux espèces (pois chiche et blé dur) cultivés en association ou séparément représente le seuil de la croissance d'une légumineuse en association avec une céréale sous la présence ou déficience du P.

2.3.2. Estimation du rendement en grain de pois chiche

Au moment de la maturité, où la quantité d'eau dans les graines est environ 15 à 10%, le rendement en grain des deux espèces cultivées en association et en culture pure dans les deux sites est déterminé dans une unité d'un m² pour chaque micro parcelle étudiée.

2.4. Analyse statistique et traitement des données

Le Protocole expérimental établis dans les deux sites était un Split Plot. Dans le but d'étudier l'effet des deux types de culture (monoculture et association) sur la croissance des plants, la nodulation, le rendement en grain, les paramètres ont été testé et analysé en utilisant l'analyse ANOVA (STATISTICA 10) / SPSS version 20.

L'analyse de la variance et le coefficient de la variation sont utilisés pour la détermination de la signification ($p < 0.05$) de la différence entre les géotypes et aussi entre les deux types de cultures dans les deux sites et les deux saisons. La régression multiple est testée entre la biomasse aérienne et nodulaire pour chaque géotype en monoculture ou en association afin de déterminer l'efficacité d'utilisation de la symbiose rhizobienne.

3. Résultat

3.1. Croissance de la plante et nodulation

La croissance des plantes des géotypes de pois chiche et le blé dur cultivés varie en réponse au type de culture (monoculture ou en association), les sites expérimentaux et la saison de croissance (Figure IV. 1). Durant les deux saisons 2018/2019, la biomasse aérienne sèche du pois chiche cultivés en monoculture et en association varie d'une manière significative entre les deux sites expérimentaux ; tel qu'elle est environ de 28 % en S1 et 36% en S2.

En S1, l'analyse a montré qu'il y a une différence significative entre les géotypes quel que soit le type de culture choisi d'où la moyenne la plus faible est enregistré par Flip 93-93 C associé avec 3.16 g/plant. Le géotype Flip 90-13C a présenté une meilleure adaptation en monoculture

sous déficience en P (S2) tandis que le génotype FLIP 88-85C est meilleur en association avec une moyenne maximale de 5.464 g/plant sous suffisance en P (S1).

Aussi, les résultats ont révélé que le système de culture a un effet significatif sur la croissance des espèces cultivés sous suffisance ou déficience en P. Le poids sec aérien de pois chiche et de blé dur en association a augmenté au cours de deux saisons de croissance de 14,95 % en 2018 et de 13,63 % en 2019 dans les deux sites par rapport aux monocultures.

Ainsi, la biomasse sèche aérienne est significativement augmenté dans le blé dur en culture intercalaire au cours de 2018 (20,44 % avec 2,78 g .plant⁻¹) et 2019 (23,36 % avec 2,70 g .plant⁻¹), respectivement (Figure IV.1). Cela signifie qu'en culture intercalaire, les cultures céréalières ont montré une meilleure adaptation en termes de biomasse aérienne par rapport à la monoculture. En revanche, les légumineuses ont affiché une amélioration plus significative de leur biomasse aérienne en monoculture par rapport à la culture intercalaire

Cependant, cette différence entre la monoculture et l'association présente d'une manière assez claire entre les deux saisons d'essai. Le génotype FLIP 01-29c. a présenté une meilleure adaptation en monoculture qu'en association avec le blé sous suffisance en P (S1) dans les deux saisons alors qu'il est meilleur en association sous déficience en P (S2) dans les deux saisons. Le génotype flip 84/92 c. en monoculture a présenté la moyenne la plus faible avec 3.099 g/plant en S1 durant la deuxième saison. Tandis que le génotype Flip 01-29c. a montré une moyenne assez élevée en association et en monoculture en S1 en 2019 (5.621 g/plant et 4.096 g/plant respectivement). La biomasse aérienne sèche (g/plant) varie d'une manière très hautement significative avec une différence de 30 % en comparant l'interaction des deux saisons et les deux sites aussi avec les types de culture et les génotypes.

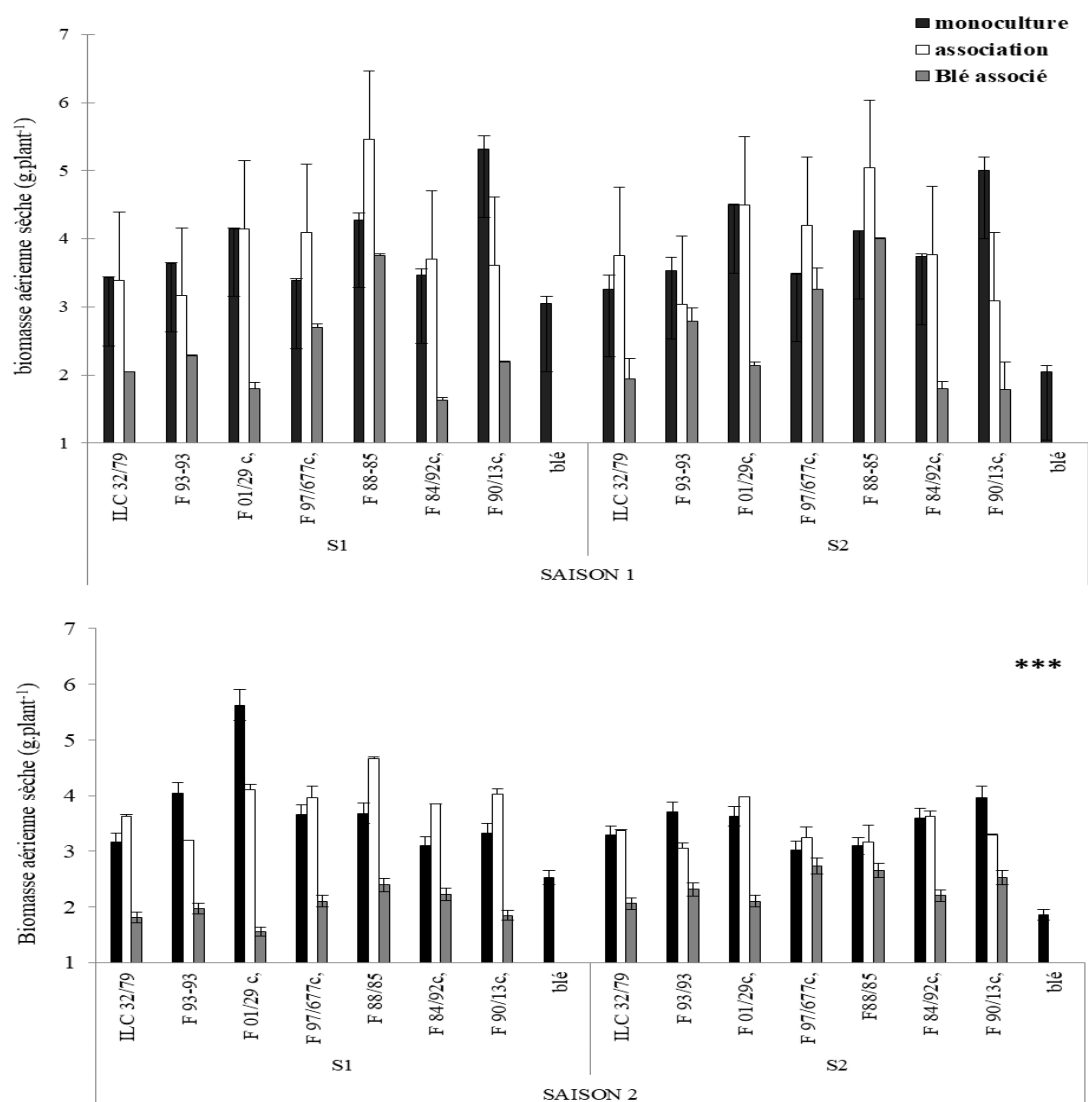


Figure IV. 1 : biomasse aérienne sèche (g/plant) des génotypes de pois chiche et blé dur cultivés en monoculture et en association sous suffisance (S1) et déficience (S2) en phosphore en 2018 (saison 1) et 2019 (saison 2).

*** signifient une variabilité très hautement significative entre S1 et S2.

Le poids sec des racines dans les deux cultures (pois chiche et blé dur) est illustré à la figure IV.2. En comparant les deux types de cultures adaptées la suffisance et déficience en P au cours des deux saisons (2018, 2019), la biomasse racinaire sèche du blé dur en culture intercalaire a augmenté de manière significative avec 39,86% en 2018 et 56% en 2019. À l'inverse, le poids sec racinaire des pois chiches a diminué en culture intercalaire avec du blé dur, de 32,34 % en 2018 et de 23,06 % en 2019, par rapport au pois chiches en monoculture (Figure IV.2). Ainsi, le poids sec racinaire moyen le plus élevé a été enregistré pour le pois chiche monoculture avec 27,68 % en 2018, tandis que le pois chiche associé présente une biomasse racinaire moyen

faible (32,34 % et 23,06 %) en 2018 et 2019 respectivement (Figure IV.2). Une différence significative de ...% a été enregistrée dans les deux sites expérimentaux entre les génotypes cultivés en monoculture et en association durant les deux saisons. Tel que le Flip 01/29 c. en monoculture a montré une moyenne élevée avec 0.648 g/plant en S1 et 0.598 g/plant en S2 en 2018. En 2018, l'association FLIP 93-93C-blé dur a influé d'une manière très hautement significative sur la biomasse racinaire sèche des deux espèces dont il a présenté une moyenne faible en biomasse racinaire par rapport à la monoculture, en parallèle, le blé dur a présenté une meilleure biomasse racinaire en association avec FLIP 93-93 avec une différence significative entre les deux sites expérimentaux. Tandis que, les génotypes FLIP 97/677 c., FLIP 90/13 c. et Flip 88-85C ont présenté une différence significative entre les deux types de cultures choisis (monoculture et association) dans les deux sites expérimentaux (S1 et S2). Le reste des génotypes n'ont présenté aucune différence entre les types de culture ni entre les deux sites expérimentaux sachant que la biomasse racinaire sèche des génotypes cultivés pure ou en association reste plus ou moins constante avec une bonne variation de biomasse racinaire du blé dur associé.

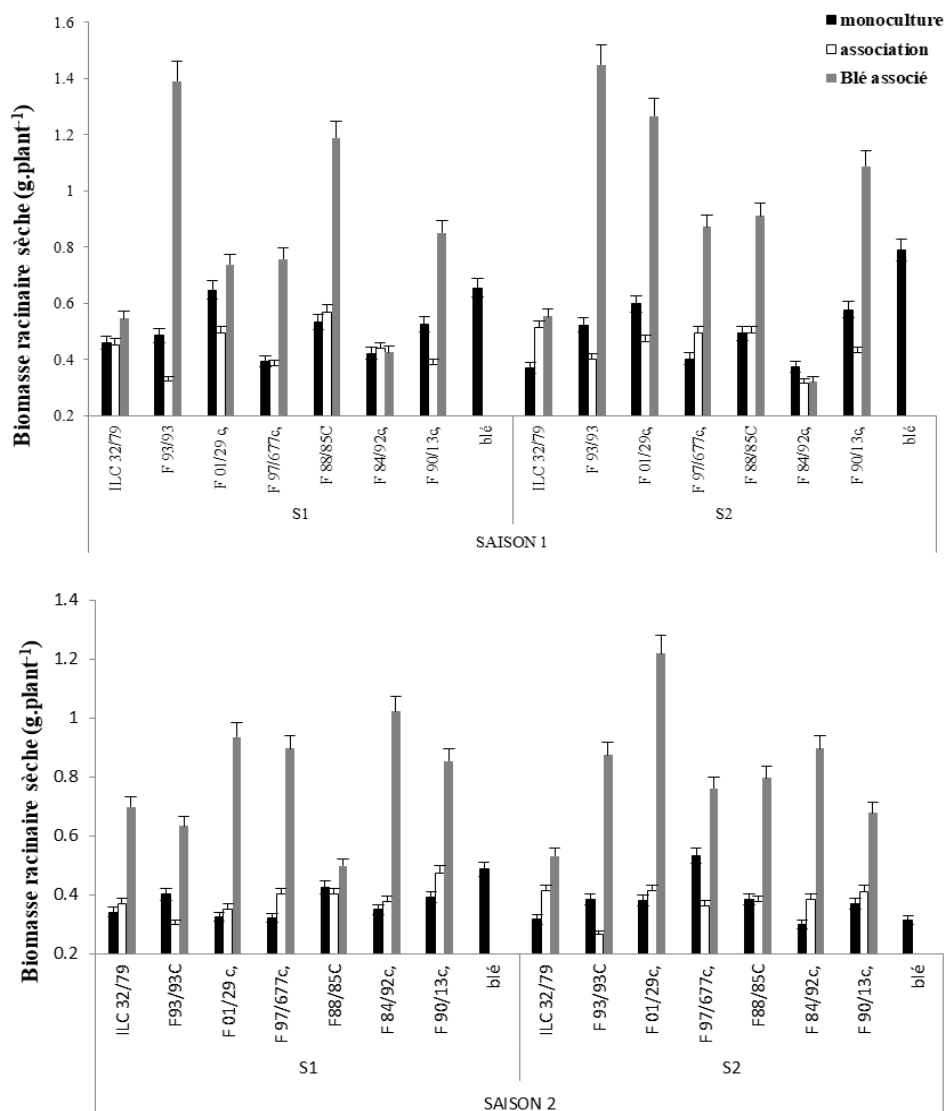


Figure IV.2 : biomasse racinaire sèche (g/plant) des géotypes de pois chiche et blé dur cultivés en monoculture et en association sous suffisance (S1) et déficience (S2) en phosphore en 2018 (saison 1) et 2019 (saison 2).

Comme le montre la figure IV.3, la biomasse nodulaire sèche du pois chiche (g.plant⁻¹) était significativement augmenté lorsqu'il était en culture intercalaire avec du blé dur (11,77 %) par rapport à la culture unique de pois chiches. Ce paramètre a augmenté de 14,52% en 2018 et de 55% en 2019 (Figure IV.3).

Ainsi, remarquant qu'en S2 sous déficience en P, les géotypes de pois chiche ont présentés des variations élevées en terme nodulaire en association par rapport à la monoculture durant les deux saisons de croissance 2018-2019.

Sous suffisance en P, les génotypes FLIP 93/93, FLIP 84/92 et FLIP 90/13 ont présenté de meilleurs résultats en monoculture qu'en association. Tandis qu'ils ont amélioré leur biomasse nodulaire en association sous déficience en P.

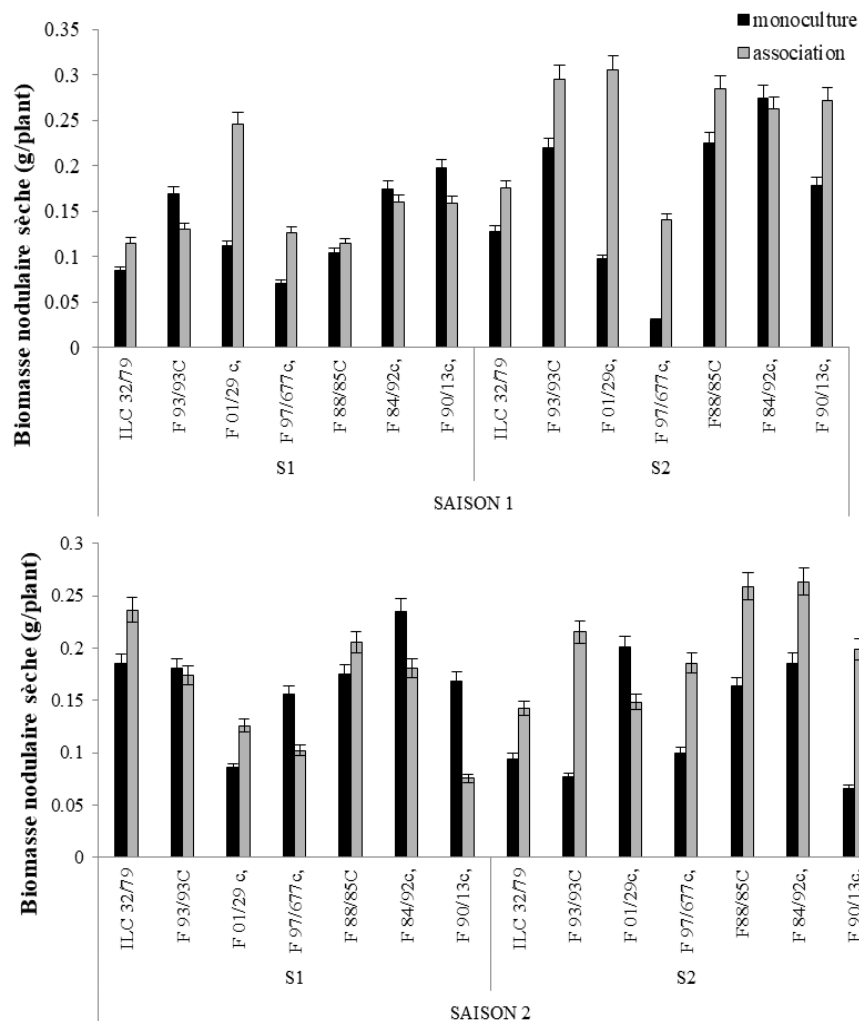


Figure IV.3 : biomasse nodulaire sèche (g/plant) des génotypes de pois chiche cultivés en monoculture et en association sous suffisance (S1) et déficience (S2) en phosphore en 2018 (saison 1) et 2019 (saison 2).

3.2. Le rendement en grain

Le rendement en grain varie en réponse de type de culture choisi voire pure ou associé, les saisons de croissance et les sites expérimentaux (S1 et S2) (Figure IV.4).

La figure IV.4 indique que le rendement en grains des deux cultures (pois chiche et blé dur) était affecté par les systèmes de culture, la quantité du P dans le sol et les saisons de croissance. Comme le montre la figure, le rendement en grains de pois chiches était significativement plus élevé en culture pure (avec 16% et moyenne de 40,06q/ha) qu'en culture intercalaire (avec 23,94% et moyenne de 28,51q/ha) au cours des deux saisons de croissance. Cependant, le

rendement en grains du blé dur en culture intercalaire était plus élevé (14,74 %) que celui de blé dur en culture unique. Cette augmentation a été plus élevée en 2018 (11%) qu'en 2019 (17,72%). Les génotypes FLIP 90-13 c., FLIP 97-677 et ILC 32-79 présentent une meilleure adaptation en association avec le blé par rapport à sa culture pure vis-à-vis le rendement durant les deux saisons d'essai et les deux sites expérimentaux. Tandis que les génotypes FLIP 84-92 c. et Flip 93-93C ont montré une moyenne de rendement en grain plus faible en association qu'en culture pure.

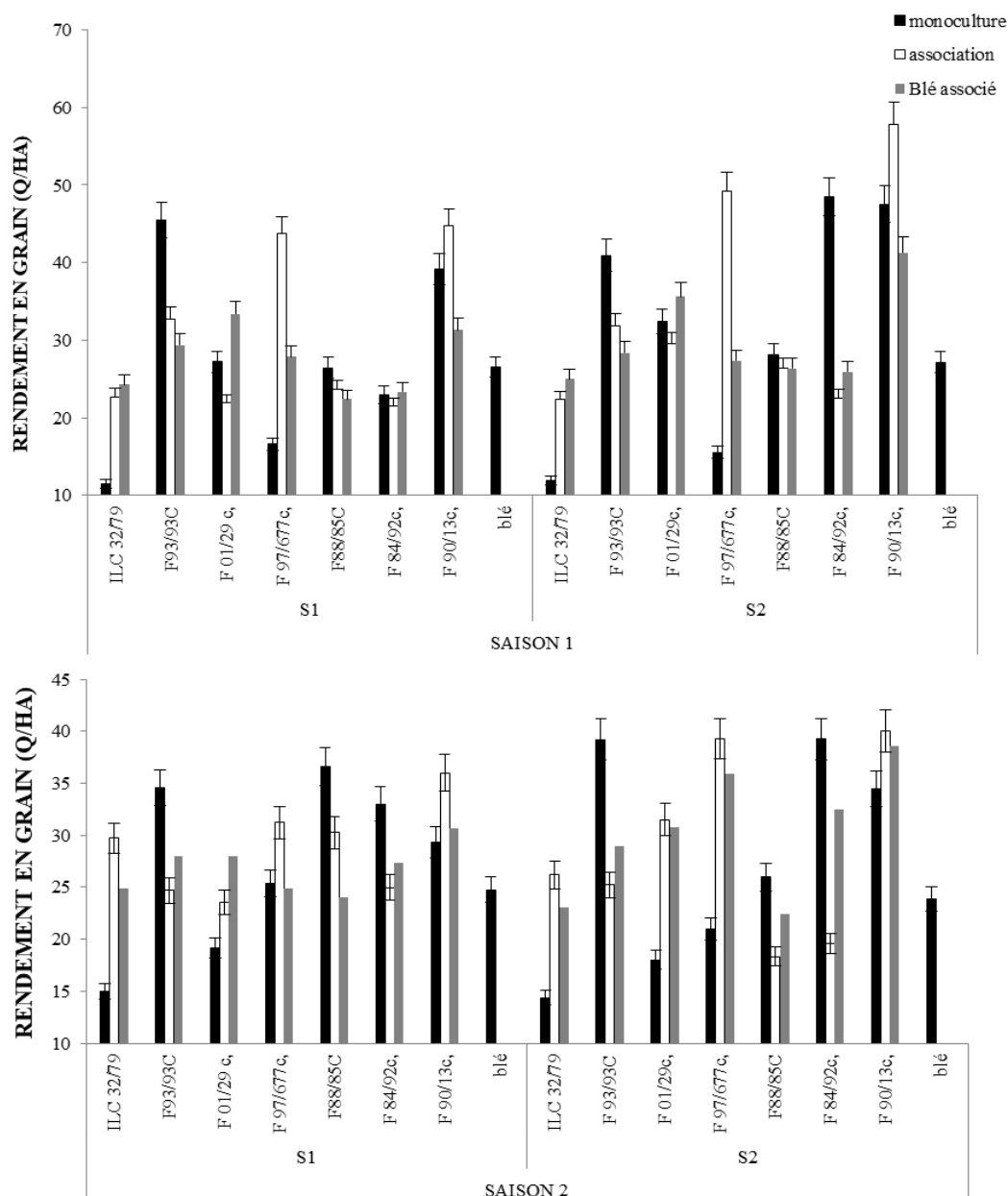
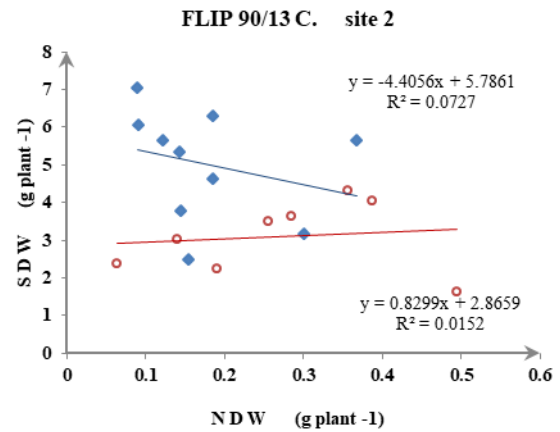
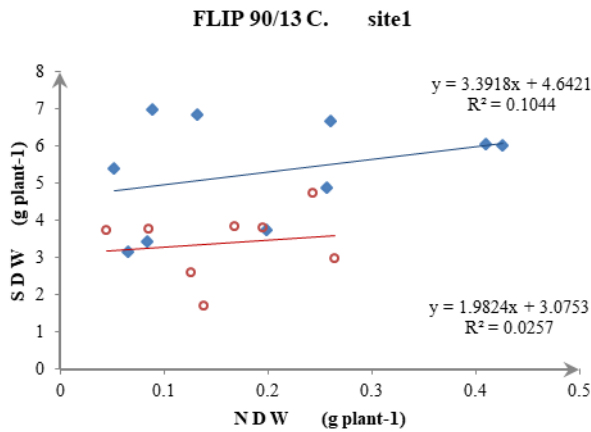
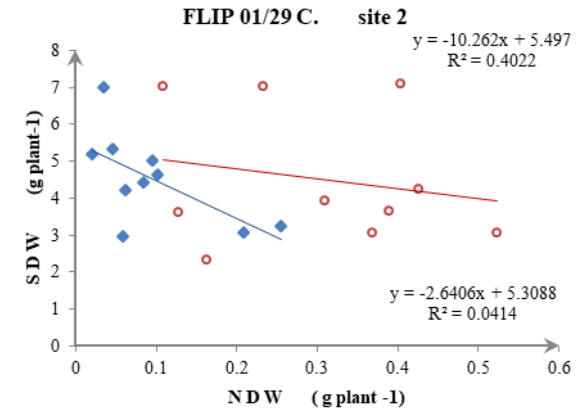
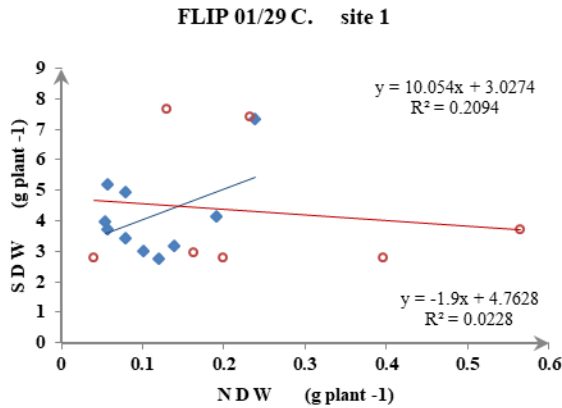
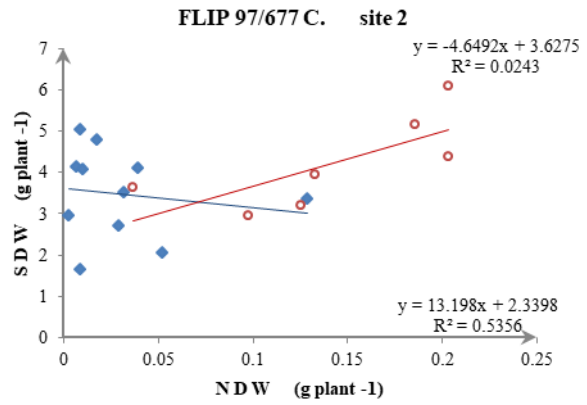
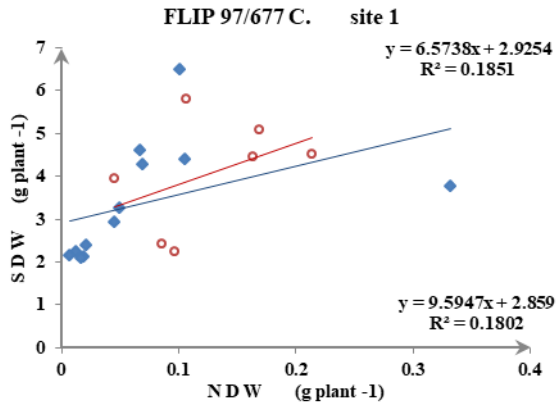
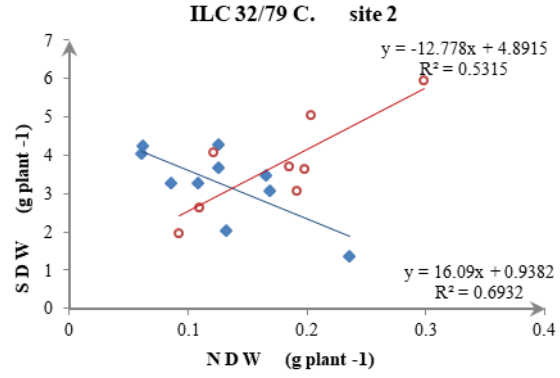
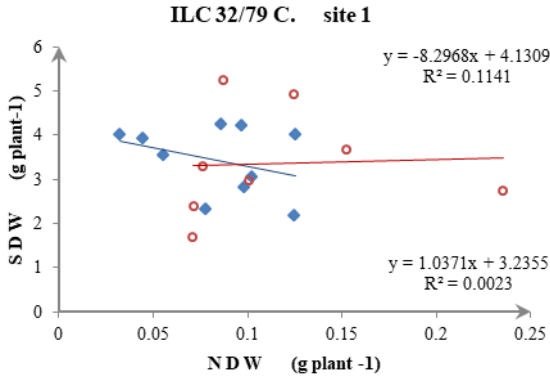


Figure IV.4 : Rendement en grain ($q\cdot ha^{-1}$) des génotypes de pois chiche et blé dur cultivés en monoculture et en association sous suffisance (S1) et déficience (S2) en phosphore en 2018 (saison 1) et 2019 (saison 2).

3.3. Efficience d'utilisation de la symbiose rhizobienne (EURS)

L'efficacité d'utilisation de la symbiose rhizobienne (EURS) est définie par plusieurs chercheurs (Drevon et al., 2011 ; Bargaz et al., 2012 ; Lazali, 2014 ; Latati et al., 2016) intéressés à l'étude d'effet de fixation symbiotique d'azote et calculée comme étant la pente de la régression linéaire entre le poids sec nodulaire et le poids sec aérien des génotypes de pois chiche et qui a montré des variations importantes, en particulier en réponse aux types culturaux choisis et aux sites expérimentaux (figure IV. 5). La relation entre les biomasses aérienne des plants et de leurs nodules a révélé une forte dépendance intercalée en comparant les différents génotypes. En S1, le poids sec aérien était également significativement et positivement corrélé avec le poids sec nodulaire pour la plupart des génotypes en association. Cependant, cet EURS était inférieur pour la plupart des génotypes de pois chiche cultivé en monoculture en S2 (Figure IV.5). D'autre part, l'EURS semble décliner (estimé à partir de la pente de régression) pour les génotypes en association dans S2 par rapport à S1.

En revanche, le génotype ILC 32-79C. a présenté une meilleure EURS en association qu'en monoculture et cela quel que soit le type de sol (en S1 ou S2), tandis que le génotype FLIP 01-29C a présenté une meilleure adaptation à la suffisance ou déficience en P quand on le cultive seul qu'en association dont il ne résiste pas à la culture intercalaire et la concurrence des cultures. Dans l'ensemble, le pois chiche cultivé en association avec le blé dur dans le S1 révèle les plus importantes valeurs de EURS.



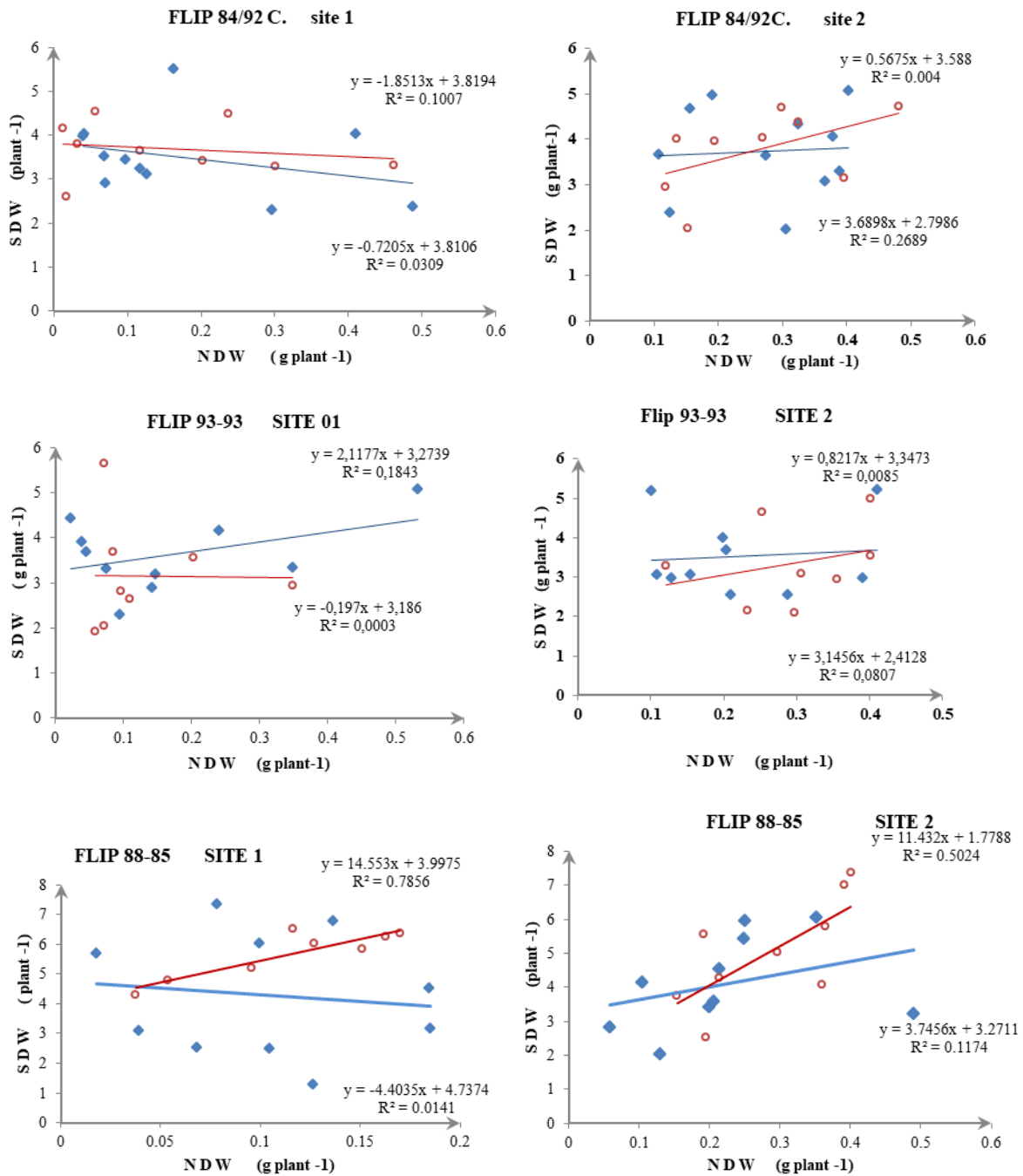


Figure IV.5 : Efficacité d'utilisation de la symbiose rhizobienne chez les génotypes de pois chiche sous deux types de cultures (monoculture en bleu) ou (associée en rouge) dans deux sites S1 et S2.

Les équations insérées dans les graphiques décrivent la fonction de régression culture pure (en haut) et associé (en bas), respectivement. Toutes les régressions ont été établies à partir des répétitions (plants).

3.4. Rapport d'équivalence des surfaces (LER)

Le rapport d'équivalence des surfaces (LER) pour la biomasse totale de la plante, rendement en grains était supérieur à 1 pour la majorité des génotypes de pois chiche (tableau IV. 2), indiquant l'avantage de l'association par rapport à la culture pure. Le LER a varié entre les saisons de croissance et les sites expérimentaux vu que les deux sites sont différents en rapport de la quantité du Phosphore dans leurs sols, il était plus élevé en 2018 et en 2019 (pour le rendement en grains) (tableau IV.2). Les génotypes 97-677C et FLIP 93-93C ont présentés les meilleurs rapports d'équivalence ce qui indique une meilleure adaptation en association sous suffisance ou déficience en P. Tandis que le génotype FLIP 01-29C a présenté une meilleure adaptation en monoculture et cela avec un LER inférieur à 1 durant les deux saisons de croissance.

Tableau IV.2 : Rapport d'équivalence en terre (LER) pour le rendement, la biomasse sèche totale des génotypes de pois chiche cultivés dans S1 et S2 au cours des deux saisons de croissance 2018 et 2019.

		LER (Land Equivalent Ratio)			
		S1		S2	
saisons	génotypes	Total DW	Rendement	Total DW	Rendement
2018	ILC 32/79C.	0,9948 ab	1,975 b	1,180 ab	1,874 b
	FLIP 97/677 C.	1,1943 c	2,641 c	1,232 a	3,168 c
	FLIP 01/29 C.	0,9943 ab	0,8031 a	1,0144 ab	0,910 a
	FLIP 90/13C.	0,688 a	1,148 ab	0,658 a	1,216 ab
	FLIP 84/92 C.	1,0583 ab	0,934 a	0,989 ab	0,4634 a
	Flip 93-93 C.	1,849 d	1,720 b	1,946 c	1,7773 bc
	FLIP 88-85 C.	1,249 c	0,8932 a	1,203 ab	0,9314 a
2019	ILC 32/79C.	1,1492 b	1,976 c	1,063 b	1,822 c
	FLIP 97/677 C.	1,0823 ab	1,231 b	1,034 b	1,874 c
	FLIP 01/29 C.	0,7583 a	1,228 b	1,076 b	1,748 c
	FLIP 90/13C.	1,1773 b	1,227 b	0,887 a	1,162 a
	FLIP 84/92 C.	1,195 b	0,756 a	1,0486 b	0,499 a
	Flip 93-93 C.	1,793 d	1,714 c	1,849 c	1,643 ab
	FLIP 88-85 C.	1,230 c	0,827 a	1,0428 b	0,706 ab

Les valeurs représentent la moyenne de 3 répétitions \pm SE (Standard Error), la probabilité est limitée à $p < 0.05$

4. Discussion

Pour mettre en évidence les bénéfices des cultures intercalaires céréales-légumineuses, cette étude s'appuie essentiellement sur la connaissance des seuils d'adaptation des légumineuses alimentaires aux stress abiotiques dans les systèmes céréaliers et sur l'amélioration de la productivité et de la croissance des cultures céréales-légumineuses mises en association. Certes, il existe des avancées dans la recherche et l'exploration des avantages des cultures intercalaires

qui nécessitent de réaliser des études approfondies pour mettre en évidence la tolérance des cultures au stress abiotique. Les résultats de ces expériences apportent de nouvelles informations sur la cohésion d'une légumineuse en association avec une céréale dans des sols déficients en P en comparant avec leur adaptation dans des sols contiennent du P. Ils sont discutés ci-dessous sous différents points de vue. Tout d'abord en termes de croissance, nous discutons de la variabilité observée des deux cultures dans deux systèmes différents et deux sites différents. Deuxièmement, nous comparons le rapport d'équivalence LER de la culture du pois chiche associée au blé dur vis-à-vis le rendement. Enfin, nous utilisons ces résultats pour évaluer l'avantage des cultures intercalaires par rapport au P.

4.1. Effets des interactions sur les performances d'association pois chiche-blé dur

Dans l'ensemble, dans le présent travail, une augmentation du poids sec aérien et racinaire du blé dur cultivé en culture intercalaire par rapport à la culture unique a été observée, contrairement au pois chiche qui a donné une augmentation en culture unique qu'en culture intercalaire au niveau des racines et des pousses. Poids sec qui explique une raison positive d'interaction, de facilitation et de complémentarité entre deux cultures associées (Brooker et al, 2014, Bargaz et al., 2017). Ce principe dit que deux espèces différentes occupant le même espace, en fonction de la surface du sol, utiliseront toutes les ressources nécessaires plus efficacement qu'une seule espèce occupant le même espace, par ex. via une meilleure utilisation de l'ensemble du volume du sol et des diverses niches biogéochimiques des nutriments (Vandermeer, 2011 ; Jensen et al., 2015).

La facilitation de la croissance du blé dur associée au pois chiche permet une utilisation accrue de ressources complémentaires, qui est l'un des principaux facteurs physiologiques d'efficacité d'utilisation du P surtout en cas de carence en P. Ceci est cohérent avec plusieurs résultats antérieurs selon lesquels la carence en P augmente la biomasse céréalière dans les systèmes de cultures intercalaires par rapport à la culture unique (Litourjidis et al. 2011, Betencourt et al. 2012, Latati et al. 2016, Kaci et al. 2018), qui ont montré des résultats similaires. Nos données sont également similaires aux résultats précédents où une carence en P peut affecter la croissance des légumineuses associées et par la suite leur fonction de fixation symbiotique de l'azote (Cong et al., 2014, Kaci et al., 2018). Au cours de dix années d'expérimentation sur le terrain en termes de cultures intercalaires, Wang et al. (2014) ont constaté une augmentation significative du rapport entre la biomasse totale de la féverole et celle du maïs. Ces améliorations bénéfiques sont dues à une plus grande capacité des légumineuses à augmenter ces activités de fixation et peuvent offrir des opportunités pour maximiser et maintenir la

croissance des plantes intercalées (Jeyabal et Kuppuswamy, 2001 ; Hauggaard-Nielsen et al., 2007). Les légumineuses, qui peuvent s'adapter à différents modes de culture et fixer l'azote atmosphérique, peuvent contribuer à maintenir une biomasse végétale accrue et un rendement céréalier accru pour les espèces avec lesquelles elles sont cultivées en association (Jeyabal et Kuppuswamy, 2001). Cette augmentation de la biomasse résulte principalement de la facilitation interspécifique de l'utilisation des nutriments entre le blé dur et le pois chiche observée au cours de la première saison de croissance. Des études récentes ont confirmé l'avantage des cultures intercalaires pour les céréales grâce aux mécanismes de facilitation mis en place par une légumineuse cultivée en association, qui était responsable de l'augmentation de la disponibilité de P et de N inorganiques par acidification de la rhizosphère lors de la fixation de N₂ (Li et al. 2009 ; Betencourt et al. 2012).

4.2. Effets de la carence en P sur le rendement en grains de pois chiches-blé dur

De nombreuses recherches sur les cultures intercalaires se sont multipliées dans de nombreux pays du monde par exemple en France, en Suède, en Chine...ect. Dix ans (2001-2010) de 22 expériences de cultures intercalaires ont été entrepris par Bedoussac et al. (2014, 2015) sur 13 sites en France et au Danemark avec deux légumineuses à grains (féverole et pois) et trois céréales (blé dur, blé tendre) et orge de printemps). Dans 91 % des expériences, les rendements totaux en grains des cultures intercalaires de céréales et de légumineuses à grains étaient supérieurs au rendement moyen des cultures individuelles, les rendements moyens des cultures intercalaires étant de 3,3 Mg ha⁻¹, comparés au rendement moyen des cultures uniques étant de 2,7 Mg ha⁻¹. Avec un rendement moyen en monoculture de 3 Mg ha⁻¹, l'avantage de rendement de la culture intercalaire peut atteindre 66 % (Bedoussac et al., 2014 ; Jensen, 2015). De même, en Chine, l'augmentation du rendement des cultures et de la productivité des terres grâce à la culture intercalaire en relais maïs-soja a été confirmée par Chen et al., 2017. Le LER de la culture intercalaire en relais maïs-soja variait de 1,85 à 2,36 au cours des saisons de culture.

Dans notre étude, un effet positif et significatif des cultures intercalaires sur le rendement total en grains qui explique un LER plus élevé et avantageux par rapport à celui constaté en monoculture, ce qui explique une performance élevée des cultures et une efficacité d'utilisation des ressources en cas de carence en P. De même, le rendement en grains du blé dur (Zhang et Li, 2003) a augmenté lors de la culture intercalaire avec la féverole (Zhang et Li, 2003). Dans ce contexte, l'estimation de la productivité des terres en utilisant le paramètre de ration équivalente terre (LER) en cultures intercalaires (céréales-légumineuses) indique que la biomasse et le rendement des céréales sont probablement meilleurs que ceux de la monoculture

du fait d'une meilleure utilisation des ressources (Dhima et al., 2007 ; Litourjidis et al., 2011 ; Latati et al., 2016, Chen et al., 2017). En comparant les deux types de cultures, les cultures intercalaires ont eu un effet positif et significatif sur le rendement des pois chiches et du blé dur par rapport à la culture unique, ce qui a ensuite abouti à un rendement LER supérieur à 1. Cela indique une amélioration des performances des cultures et de l'efficacité de l'utilisation des ressources dans des conditions de faible -Disponibilité des carences en P, où le LER du rendement en grains était significativement plus élevé. La différence entre les deux types de cultures suivies dans nos essais en termes d'EURS indique l'influence sur la disponibilité du P dans les sols déficients en P, où les légumineuses sont la culture la plus importante. Ce qui implique que la fixation des fixateurs d'azote atmosphérique N_2 a certainement augmenté jusqu'à plusieurs changements induits par la rhizosphère (libération de protons, acides organiques, exsudation, phosphatases acides, etc.) qui ont contribué à augmenter le P dans le sol et par la suite sa disponibilité et son intérêt pour la croissance des plantes (Hinsinger et al., 2003 ; Alkama et al., 2009, 2012 ; Bargaz et al., 2012 ; Latati et al., 2016).

5. Conclusion

Cette étude a évalué l'effet de la culture intercalaire de pois chiches et de blé dur sur la biomasse et le rendement en grain dans des sols suffisamment pourvus en P (S1) et déficients en P (S2) en tenant compte de la fixation symbiotique de N_2 . Dans les sols riche en P, le pois chiche améliore sa fixation symbiotique de l'azote ce qui a favorisé sa croissance et rendement ainsi que la croissance de la culture sous-jacente en cas d'association. L'augmentation de la biomasse aérienne, racinaire et nodulaire ainsi que du rendement en grains ont été liée à la stimulation de l'efficacité de l'utilisation de la symbiose rhizobienne (indiquant une efficacité de symbiose plus élevée), de la disponibilité accrue du phosphore et une utilisation plus efficace des ressources du sol. Dans les sols déficients en P, les cultures intercalaires ont eu un effet positif sur l'absorption de P, en particulier pour le blé dur, dont l'amélioration en surface était probablement due aux performances racinaires des légumineuses. Bien que les pois chiches et le blé dur absorbaient moins de P dans les cultures intercalaires, les interactions entre les espèces ont considérablement amélioré la nutrition en P du blé dur. L'étude démontre que les cultures intercalaires (pois chiche-blé dur) sont avantageuses car elles augmentent la biomasse des plantes et le rendement en grains.

Conclusion générale

Conclusion générale et perspectives

Afin d'atteindre et répondre aux principaux objectifs de cette recherche, les résultats obtenus au cours de trois ans d'expérimentation sur terrain permettent de vérifier et clarifier la pertinence des critères d'adaptation des légumineuses alimentaires misent en association avec les céréales en réponse à la disponibilité en phosphore dans les sols déficients en P. En association pois chiche-blé dur, l'objectif principal était d'évaluer certains processus rhizosphériques dont on a pris l'attention au rôle fonctionnel de la symbiose rhizobienne. En conséquence, les résultats ont permis de donner une réponse à plusieurs questions soulevées dans notre problématique de recherche.

A la lumière des résultats obtenus dans les expérimentations sous des conditions non contrôlés, les génotypes de pois chiche ont montré des variations importantes sous déficience en phosphore. Tout d'abord, une biomasse nodulaire et aérienne réduite a été remarqué chez la majorité des génotypes de pois chiche misent en culture pure par rapport à l'association. En plus, cette nodulation des génotypes a accumulé des teneurs importantes du P inorganique sous sa déficience.

Les résultats présentés au chapitre II montrent une augmentation de la biodisponibilité du P et N dans la rhizosphère du pois chiche mis en multiplication dans des conditions de limitation du P dans le sol (Figure II.9 et tableau II.5). Cette biodisponibilité du P est accompagnée par une meilleure EUSR (Figure II.8) et est significativement influencée par la croissance nodulaire, dont elle est positivement corrélée avec les teneurs en P assimilable (Figure II.10). En mettant en lumière le rôle crucial du phosphore dans la nodulation, ces résultats suggèrent que cet élément joue un rôle déterminant dans le fonctionnement et le développement nodulaire.

Ainsi, l'étude comparative entre le système d'association pois chiche-blé dur et la monoculture a mis en évidence l'avantage de la culture intercalaire en facilitant le prélèvement du P notamment chez le blé dur. Ces avantages sont probablement dus à la fixation symbiotique de N₂ par le pois chiche associé avec le blé dur. Ces interactions positives entre les cultures intercalaires se traduisent par une augmentation de la production de biomasse et du rendement en grains du blé dur associé, surtout dans les sols déficients en P. Comme l'ont démontré les résultats des campagnes agricoles de 2018-2019, résumés dans les chapitres III et IV.

Sous déficience en phosphore, nos résultats d'association céréale-légumineuse, présentés dans le chapitre III, démontrent une meilleure efficacité d'utilisation de la symbiose rhizobienne chez le pois chiche cultivé en association avec le blé dur, comparé à la monoculture. Les variations marquées dans le chapitre III à propos d'efficacité d'utilisation du phosphore pour la fixation

symbiotique chez les géotypes de pois chiche étudiés en association avec une céréale suggèrent une orientation par un ensemble de facteurs. Basant sur les recherches antérieures sur la rhizosphère, il est crucial d'approfondir notre compréhension des mécanismes d'adaptation du pois chiche au déficit en P, en particulier dans les systèmes de production intensifs. Il est donc impératif d'explorer plus en détail les interactions entre les nodosités fixatrices de N₂ et leur environnement rhizosphérique, souvent soumis à des stress abiotiques.

Aussi, les résultats obtenus concernant le rendement des deux cultures sous la présence ou l'absence du P du sol ont révélé des différences notables (chapitre IV). Le rendement du pois chiche est supérieur en monoculture comparé à l'association, tandis que le blé dur associé affiche un meilleur rendement en culture intercalaire. Cela souligne le rôle essentiel de la culture intercalaire par rapport à la culture pure. Associer les céréales aux légumineuses augmente le rendement des céréales par rapport à leur culture en pure ou en rotation, ce qui se traduit par un LER (Land Equivalent Ratio) supérieur à 1. En association, le pois chiche a amélioré sa biomasse totale ainsi que celle du blé dur, augmentant ainsi la quantité de paille produite. De plus, l'association a également amélioré le rendement en grains du blé dur, augmentant ainsi la quantité de graines récoltées. Par conséquent, l'association de ces cultures répond non seulement aux besoins en grains pour l'alimentation humaine, mais aussi à ceux en fourrage pour l'alimentation animale, contribuant à la durabilité et à l'efficacité des systèmes agricoles dont la paille produite constitue une source précieuse de matière sèche pour l'alimentation animale, offrant un apport en fibres et en nutriments essentiels. De plus, la qualité nutritive de cette paille peut être améliorée grâce à la richesse en azote des légumineuses, favorisant une meilleure valorisation par le bétail. Cette approche contribue non seulement à augmenter la productivité des systèmes agricoles mais aussi à promouvoir une alimentation plus durable et équilibrée pour le bétail, réduisant ainsi la dépendance aux ressources externes telles que les concentrés et les fourrages artificiels.

D'une manière aussi générale, et pour bien préciser notre recherche pour des études similaires et faire face à la déficience en phosphore, l'utilisation des géotypes présentant une croissance et un rendement optimaux dans des sols peu fertiles (chapitre II) peut contribuer à améliorer la nutrition en phosphore, ainsi, des géotypes plus efficaces, grâce à leur biomasse élevée, démontrent également une meilleure utilisation de la symbiose rhizobienne et par la suite de meilleur rendement.

Bien que l'agriculture continue d'évoluer des systèmes de production durables, les légumineuses alimentaires et fourragères resteront essentielles, en particulier à mesure que les cultures s'étendent sur des sols moins fertiles. L'utilisation efficace de ces espèces dans les systèmes de

production actuels surtout dans les systèmes d'association des cultures avec les céréales dépendra avant tout de la compréhension et de l'optimisation de leur symbiose rhizobienne dans des conditions environnementales diverses.

L'exploitation de symbioses performantes dans des conditions de P limité nécessite une évaluation complète des associations symbiotiques d'une part et impliquer ces améliorations symbiotiques dans les cultures intercalaires d'une autre part. Cela permettra de proposer aux agriculteurs un système de production durable, avec des impacts économiques, agronomiques et environnementaux considérables. La fixation symbiotique de l'azote joue un rôle central dans une agriculture productive et durable. Les effets positifs sur la production agricole se traduiront par une meilleure gestion des contraintes environnementales, une utilisation judicieuse de quantités réduites d'engrais et l'exploitation de la vaste variabilité génotypique aux traits agronomiques souhaitables.

Dernièrement, il est préférable de travailler en collaboration avec des microbiologistes afin de faire l'étude génomique des souches rhizobienne permettant d'évaluer la fixation symbiotique surtout dans les systèmes des cultures intercalaires pour améliorer la production de la filière de la céréaliculture algérienne et aussi avec des chimistes afin de savoir l'intérêt de l'association des légumineuse-céréales dans l'amélioration de la qualité nutritionnelle des graines récoltés en association surtout cultivés sous des contraintes abiotiques.

Références bibliographique

1. A.F.N.O.R., Norme U, 42-246, Tour Europe, Paris.
2. Ahmed F, Gaur P.H. et Crosse J., 2005. Genetics resources, chromosomes, In Singh J., Prem et Jauliam. Ed. Quae. Vol.1. 326P.
3. Ait Abdellah Djennadi F., Dekkiche N., Ghalem Djender Z. et Oumdjekane K., 2010. Cultures et couts de production des grandes cultures. Ed : ITGC alger. 6P.
4. Alkama N., Bi Bolou E. B., Vailhe H., Roger L., Ounane S. M., Drevon J. J., 2009. Genotypic variability in P use efficiency for symbiotic nitrogen fixation is associated with variation of proton efflux in cowpea rhizosphere. *Soil Biology and Biochemistry*, 41(9), 1814–1823.
5. Alkama N., 2010. Adaptation de la symbiose rhizobienne chez le haricot à la déficience en phosphore ; détermination de la réponse de la plante en terme d'échange gazeux et de fluc minéraux échangés avec la rhizosphère. Thèse de doctorat. ENSA ElHarrach Alger. 180 p.
6. Alkama N., Ounane G., Drevon J.J., 2012. Is genotypic variation of H⁺ efflux under P deficiency linked with nodulated-root respiration of N₂-fixing common-bean (*Phaseolus vulgaris* L.)?. *J. Plant Physiol.* 169, 1084–1089.
7. Allito B., Nana E.-M., Alemneh A., 2015. Rhizobia Strain and Legume Genome Interaction Effects on Nitrogen Fixation and Yield of Grain Legume: A Review. *Mol. Soil Biol.*, 6, 1–12.
8. Andrews D.J., et Kassam A.H., 1976. The importance of multiple cropping in increasing world food supplies. Pages 1-10 in Multiple cropping (Papendick, R.I., Sanchez, P.A., and Triplett, G.B., eds.). American Society of Agronomy Special Publication 27.
9. ANNE P., 1945. Sur le dosage rapide du carbone organique dans les sols Ann: AgronJuin, 1945, 5ème année, n° 2, pp 161-172.
10. APG , 2003. An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for orders and families of flowering plants: APG II. *Bot. J. Linn. Soc*141: 399-436.
11. Arora D., et Gaur A.C., 1978. Periodic microbial solubilization of P labelled hydroxyapatite. *Indian J. Microbiol.* 18 : 193-194.
12. Arumuganathan K. and Earle E.D., 1991. Estimation of nuclear DNA content of plants by flow cytometry. *Plant Mol. Biol. Reporter* 9:221–231.
13. Babar B. M., Shah T. M., Abbas G. and Ahsanul haq M., 2009. Genotype X environment interaction for seed yield in Kabuli chickpea (*Cicer arietinum* L). genotypes developed through mutation breeding. *Pakistan Journal of Botany.* 4:1883-1890.bacteria. *Soil and environnement.*, 1: 56-59.
14. Bado B. V., 2002. Rôle des légumineuses sur la fertilité des sols ferrugineux tropicaux des zones guinéenne et soudanienne du Burkina Faso. Thèse de Doctorat. Université Laval, Quebec. 197 p.
15. Bamouh A., Noufiri H., Zeggaf T. et Moutawakil H., 2002. Développement et application d'un modèle de simulation du bilan hydrique (AGROSIM) à la prévision des rendements de la fève et du pois chiche en zone semi-aride

marocaine. Proceedings de la Conférence Internationale ; Politiques d'irrigation: Considérations micro et macroéconomiques. Agadir, Maroc : 638-665.

16. Banik P., Midya A., Sarkar B. K. et Ghose S. S., 2006. Wheat and chickpea intercropping systems in an additive series experiment: Advantages and weed smothering. *European Journal of Agronomy* 24 (4):325–32. doi:10.1016/j.eja.2005.10.010 .
17. Bargaz A., 2012. Caractérisation Agrophysiologique Et Biochimique De Symbioses Haricot (*Phaseolus vulgaris*)-Rhizobia Performantes Pour La Fixation Symbiotique De L'Azote Sous Déficit En Phosphore. Thèse de doctorat. Faculté des sciences et techniques. Université cadi ayyed. Merrakech. 163p.
18. Bargaz A., Ghoulam C., Amenc L., Lazali M., Faghire M., Abadie J., Drevon J.J., 2012. A phosphoenol pyruvate phosphatase transcript is induced in the root nodule cortex of *Phaseolus vulgaris* under conditions of phosphorus deficiency. *J. Exp. Bot.* 63, 4723–4730.
19. Bargaz A., Noyce G. L., Fulthorpe R., Carlsson G., Furze J. R., Jensen E. S., Dhibac D. et Isaac M. E., 2017. Species interactions enhance root allocation, microbial diversity and P acquisition in intercropped wheat and soybean under P deficiency. *Applied Soil Ecology* 120:179–88. doi:10.1016/j.apsoil.2017.08.011 .
20. Baudoin J.P., 2001. Contribution des ressources phylogénétiques à la sélection variétale de légumineuses alimentaires tropicales. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 5(4) : 221–230.
21. Beaulieu C., Lizotte P.L., 2018. Positionnement des engrais de synthèse dans les céréales. Développement agricole des basques, bas-saint-laurent, québec, canada version 2018-10. (Source : www.gemas.asso.fr)
22. Bedoussac L., et Justes E., 2010. The efficiency of a durum wheat-winter pea intercrop to improve yield and wheat grain protein concentration depends on N availability during early growth. *Plant Soil* 330, 19–35. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0082-2>
23. Bedoussac L., Justes E., 2011. A comparison of commonly used indices for evaluating species interactions and intercrop efficiency: application to durum wheat-winter pea intercrops. *Field Crops Res.* 124, 25–36.
24. Bedoussac L., Journet E. P., Hauggaard-Nielsen H., Naudin C., Corre-Hellou G., Prieur L., Jensen E. S., Justes E., 2014. Chapter 3. Eco-Functional Intensification by Cereal-Grain Legume Intercropping in Organic Farming Systems for Increased Yields, Reduced Weeds and Improved Grain Protein Concentration. *Organic farming, prototype for sustainable agricultures.* 47-63. doi:10.1007/978-94-007-7927-3_3
25. Bedoussac L., Journet E. P., Hauggaard-Nielsen H, Naudin C., Corre-Hellou G., Jensen E. S., Prieur L et Justes E., 2015. Ecological principles underlying the

- increase of productivity achieved by cereal-grain legume intercrops in organic farming. A review. *Agron. Sustain. Dev.* (2015) 35:911–935
26. Belel M. D., Halim R. A., Rafii M. Y. et Saud H. M., 2014. Intercropping of Corn With Some Selected Legumes for Improved Forage Production: A Review. *Journal of Agricultural Science*; 6 (3):48 ISSN 1916-9752.
 27. Ben Mbarek K., Boujelben A., Boubaker M. et Hannachi C., 2009. Criblage et performances agronomiques de 45 génotypes de pois chiche (*Cicer arietinum* L.) soumis à un régime hydrique limité. *Biotechnologies Agronomique et Sciences Environnementales.*, 3:381-393.
 28. Betencourt E., Duputel M., Colomb B., Desclaux D. et Hinsinger P., 2012. Intercropping promotes the ability of durum wheat and chickpea to increase rhizosphere phosphorus availability in low P soil. *Soil Biology and Biochemistry.* 46, 21–33.
 29. Blesh J., 2017. Functional traits in cover crop mixtures: Biological nitrogen fixation and multifunctionality. *Journal of Applied Ecology*, 55(1), 38–48.
 30. Boulal H., Zeghouane O., El Mourid M. R. S., 2007. Guide pratique de la conduite des céréales d'automne (Blé et Orge) dans le Maghreb (Algérie, Maroc, Tunisie). ED ITGC, Alger. 176p.
 31. Brahimi S., Toumatia O., Drevon J. J., Zitouni A., et Lazali M., 2022. Intercropping legumes and cereals increases resource use efficiency and crop productivity in low phosphorus soils under semi-arid Mediterranean conditions. *Agroecology and Sustainable Food Systems* 46 (10):1482–1501. doi:10.1080/21683565.2022.2121951 .
 32. Braun P. H., Planquaert P. H. et Wery J., 1988. Pois chiche : culture, utilisation; Brauchure. Ed. ITCF 11p.
 33. Brooker R. W., Bennett A. E., Cong W.-F., Daniell T. J., George T. S., Hallett P. D., Hawes C., Lanetta P. P. M., Jones H. G., Karley A. J., Li L., Mckenzie B. M, Pakeman R. J., Paterson E., Schob C., Shen J., Squire G., Watson C. A., Zhang C., Zhang F., Zhang J. et White P. J., 2014. Improving intercropping: a synthesis of research in agronomy, plant physiology and ecology. *New Phytologist*, 206(1), 107–117.
 34. Caldwell R.M., et Hansen J.W., 1993. Simulation of multiple cropping systems with CropSys. In: de Vries, F.P., Teng, P., Metselaar, K. (eds) *Systems approaches for agricultural development*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-011-2842-1_24
 35. Callaway R.M., 1995. Positive interactions among plants. *Bot. Rev* 61, 306–349 <https://doi.org/10.1007/BF02912621>
 36. Chabot R., Antoun H., et Cescas M. P., 1993. Stimulation de la croissance du maïs et de la laitue romaine par des microorganismes dissolvant le phosphore inorganique. *Canadian Journal of Microbiology*, 39(10), 941–947. doi:10.1139/m93-142

37. Chamkhi I., Benali T., Aanniz T., El Menyiy N., Guaouguaou F. E., El Omari N., El-Shazly M., Zengin G., et Bouyahya A., 2021. Plant-microbial interaction: The mechanism and the application of microbial elicitor induced secondary metabolites biosynthesis in medicinal plants. *Plant Physiology & Biochemistry* 167:269–95. doi:10.1016/j.plaphy.2021.08.001 .
38. Chang S.C., et Chu W.K., 1961. The fate of soluble phosphate applied to soils. *J. Soil Sci.* 12 : 286-293
39. Chen P., Du Q., Liu X., Zhou L., Hussain S., Lei L., Song C., Wang X., Liu W., Yang F., et al., 2017. Effects of reduced nitrogen inputs on crop yield and nitrogen use efficiency in a long term maize-soybean relay strip intercropping system. *Public Library of Science ONE* 12 (9):e0184503. doi:10.1371/journal.pone.0184503 .
40. Condron L.M. et Tiessen H., 2005. Interactions of organic phosphorus in terrestrial environments. In: Turner B.L., Frossard E. and Baldwin D.S. Eds, *Organic Phosphorus in the Environment*. CABI Publishing, Wallingford, Oxon, UK, p. 295-307.
41. Cong W. F., Hoffland E., Li L., Six J., Sun J.H., Bao X.G., Zhang F. S. et Van Der Werf W., 2014. Intercropping enhances soil carbon and nitrogen. *Global Change Biology*, 21(4), 1715–1726.
42. Corre-Hellou G. et Crozat Y., 2005. N₂ fixation and N supply in organic pea (*Pisum sativum* L.) cropping systems as affected by weeds and peaweevil (*Sitona lineatus* L.). *European Journal of Agronomy* Volume 22, Issue 4, Pages 449-458
43. Davies A., 2001. Competition between grasses and legumes in established pastures. In *Competition and succession in pastures* (pp. 63-83). Wallingford UK: Cabi.
44. Dawson C. J., et Hilton J., 2011. Fertiliser availability in a resource-limited world: Production and recycling of nitrogen and phosphorus. *Food Policy* 36:14–22. doi:10.1016/j.foodpol.2010.11.012 .
45. Delvasto P., Valverde A., Ballester A., Muñoz J. A., González F., Blázquez M. L., et García-Balboa C., 2008. *Diversity and activity of phosphate bioleaching bacteria from a high-phosphorus iron ore. Hydrometallurgy*, 92(3-4), 124-129. doi:10.1016/j.hydromet.2008.02.007
46. De Kroon H., 2007. ECOLOGY: How Do Roots Interact? *Science*, 318(5856), 1562-1563. doi:10.1126/science.1150726
47. Devau N., Hinsinger P., Le Cadre E. et Gérard F., 2011. Root-induced processes controlling phosphate availability in soils with contrasted P-fertilized treatments. *Plant and Soil* 348, 203-218.

48. Dhaoui k., 2007. Research of strategies for improving phosphorus use efficiency in *Vicia faba* L. conduces in pluvial conditions in Morocco. *Prom.; Ledent, Jean. Francois* [Http://hdl.handle.net/2078.1/4578](http://hdl.handle.net/2078.1/4578).
49. Dhima K.V., Lithourgidis A.S., Vasilakoglou I.B. et Dordas C.A., 2007. Competition indices of common vetch and cereal intercrops in two seeding ratio. *Field Crops Res.* 100, 249–256.
50. Domergue O., 2017. Diversité fonctionnelle de rhizobia associés à la féverole, en agro-écosystème Sud de France. Thèse de Doctorat. Université de recherche Paris Sciences et Lettres. 232 p.
51. Dommergues Y., Duhaux E. et Hoang G.D., 1999. Les arbres fixateurs d'azote : Caractéristiques fondamentales et rôle dans l'aménagement des écosystèmes méditerranéens et tropicaux. Y. Dommergues (ed.). Édition espaces 34. Paris. 475 p.
52. Doré T, Makowski D, Malézieux E, Munier- Jolaind N, Tchamitchiane M, Tittone P., 2011. Facing up to the paradigm of ecological intensification in agronomy: Revisiting methods, concepts and knowledge. Review. *Eur. J. Agron.*, **34**: 197-210.
53. Drevon J-J, Araujo A., Alkama N., Bargaz A., Bebbe S., et al., 2009. Interactions between legume N₂ fixation and phosphorus biogeochemical cycle for sustainable agriculture. MICROBIOD : Biotechnologie Microbienne au service du Développement, Nov 2009, Marrakech, Morocco. (hal-02757415)
54. Drevon J.J., Abadie J., Alkama N., Andriamananjara A., Amenc L., Bargaz A., Carlsson G., Lazali M., Ghoulam C., Ounane S.M., 2015. Phosphorus use efficiency for N₂ fixation in the rhizobial symbiosis with legumes. In: *de Bruijn, F.J. (Ed.), Biological Nitrogen Fixation*. Wiley, pp. 455–464.
55. Drevon J. J., 2018. Efficacité d'utilisation du phosphore pour la fixation symbiotique de l'azote et phytases des nodules de légumineuses. Innovations Agronomiques, INRA, 2017, 60, pp.3-10. <hal-01684897>
56. Duc G., 1997. Faba bean (*Vicia faba* L.). *Field Crops Research*. 53: 99-109.
57. Duranti M. et Gius C., 1997. Legume seeds: protein content and nutritional value. *Field Crops Research Volume 53, Issues 1–3, July 1997, Pages 31-45*. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(97\)00021-X](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(97)00021-X)
58. Dyson T., 1999. World food trends and prospects to 2025. *Proceedings of the National academy of Sciences*, 96(11), 5929-5936.
59. Erler F., Ceylan F., Erdemir T., and Toker C., 2009. Preliminary results on evaluation of chickpea, *Cicer arietinum*, genotypes for resistance to the pulse beetle, *Callosobruchus maculatus*. *Journal of Insect Science.*, 9:58-72.
60. Eskandari H. 2012. Intercropping of maize (*Zea mays*) with cowpea (*Vigna sinensis*) and mungbean (*Vigna radiata*): effect of complementarity of intercrop components on resource consumption, dry matter production and legumes forage quality. *J. Basic Appl Scientific Res* 2: 355-360.

61. Exner D. N. , Cruse R. M., 1993. Interseeded Forage Legume Potential as Winter Ground Cover, Nitrogen Source, and Competitor. *Journal of Production Agriculture*. <https://doi.org/10.2134/jpa1993.0226>
62. FAO STAT, 2024. Agricultural production, crop primary database. Food and agricultural organization of the United Nations, Rome. <http://faostat.fao.org/faostat/>.
63. Faghire M., Bargaz A., Farissi M., Palma F., Mandri B., Lluch C., ... et Ghoulam C., 2011. Effect of salinity on nodulation, nitrogen fixation and growth of common bean (*Phaseolus vulgaris*) inoculated with rhizobial strains isolated from the Haouz region of Morocco. *Symbiosis*, 55, 69-75.
64. Faghire M., 2012. Rôle des microorganismes symbiotiques (cas de rhizobia) dans l'amélioration de la production agricole de *Phaseolus vulgaris* sous stress salin. Thèse de Doctorat. Faculté de sciences et techniques. Université cadi ayyed. Marrakech. 111 p.
65. Farissi M., Ghoulam C., Bouizgaren A., 2013. Variabilité de la tolérance à la salinité de la luzerne : évaluation au stade germination de populations issues de différents agro-écosystèmes marocains. *Fourrages*; 216: 329-332.
66. Farissi M., Aziz F., Bouizgaren A., et Ghoulam C., 2014. La symbiose Légumineuses-rhizobia sous conditions de salinité: Aspect Agro-physiologique et biochimique de la tolérance [Legume-rhizobia symbiosis under saline conditions: Agro-physiological and biochemical aspects of tolerance]. *Int. J. Innov. Sci. Res*, 11, 96-104.
67. Feddal M. A., 2015. Problématique de l'introduction des techniques culturales simplifiées pour la mise en place des grandes cultures en Algérie. Thèse de doctorat. ENSA, El Harrach alger. 296p .
68. Fridley J. D., 2001. The influence of species diversity on ecosystem productivity: how, where, and why? *Oikos*, 93(3), 514–526. doi:10.1034/j.1600-0706.2001.930318.x
69. Frossard E., Condron L. M., Oberson A., Sinaj S., et Fardeau J. C., 2000. Processes governing phosphorus availability in temperate soils. *Journal of environmental quality*, 29(1), 15-23.
70. Frossard E., Julien P., Neyroud J.A. et Sinaj S., 2004. Le phosphore dans les sols. État de la situation en Suisse. Cahier de l'environnement no 368. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, Berne. 180 p.
71. Fustec, J., Lesuffleur, F., Mahieu, S. *et al.*, 2010. Nitrogen rhizodeposition of legumes. A review. *Agron. Sustain. Dev.* **30**, 57–66 <https://doi.org/10.1051/agro/2009003>
72. Gachon L., 1973. Vieillessement de divers engrais phosphates en relation avec le type de sol, étudié par la méthode de Chang et de Jackson. *Ann. Agron. (Paris)*, 24 : 585-613.
73. Gadagi R. S., et Sa T., 2002. New isolation method for microorganisms solubilizing iron and aluminum phosphates using dyes. *Soil Science and Plant Nutrition*, 48(4), 615–618. doi:10.1080/00380768.2002.10409246

74. Gan Y.T., Miller P.R., Liu P.H., Stevenson F.C., et McDonald C.L., 2002. Seedling emergence, pod development, and seed yields of chickpea and dry pea in a semiarid environment. (Abstract) *Can. J. Plant Sci.* vol. 82, 3, 531-537.
75. Garland G., Bünemann E. K., Oberson A., Frossard E. et Six J., 2017. Plant-mediated rhizospheric interactions in maize-pigeon pea intercropping enhance soil aggregation and organic phosphorus storage. *Plant and Soil* 415 (1– 2):37–55. doi:10.1007/s11104-016-3145-1 .
76. Gérard R ., 1993. Respiration et diffusion de l'oxygène dans la symbiose fixatrice d'azote ; Soja-bradirhizobium japonicum. Thèse de doctorat. ENSA monpellier 98p.
77. Ghanbari-Bonjar A., et Lee H. C., 2003. Intercropped wheat (*Triticum aestivum* L.) and bean (*Vicia faba* L.) as a whole-crop forage: effect of harvest time on forage yield and quality. *J. Grass and Forage Science*. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2494.2003.00348.x>.
78. Giller K.E., Wilson K.J., Jefferson R.A., 1991. β -Glucuronidase (GUS) Operon Fusions as a Tool for Studying Plant-Microbe Interactions. In: Hennecke, H., Verma, D.P.S. (eds) *Advances in Molecular Genetics of Plant-Microbe Interactions Vol. 1. Current Plant Science and Biotechnology in Agriculture*, vol 10. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-015-7934-6_35
79. Goldstein A.H., 2007. Future trends in research on microbial phosphate solubilization: one hundred years of insolubility. In: Velázquez, E., RodríguezBarrueco, C. (Eds.), *First International Meeting on Microbial Phosphate Solubilization*. Springer, Dordrecht, The Netherlands, pp. 91–96.
80. Graham M. A., Ramírez M., Valdés-López O., Lara M., Tesfaye M., Vance C. P., et Hernandez G., 2006. Identification of candidate phosphorus stress induced genes in *Phaseolus vulgaris* through clustering analysis across several plant species. *Functional Plant Biology*, 33(8), 789-797.
81. Hagström J., James W. M., et Skene K. R., 2001. A comparison of structure, development and function in cluster roots of *Lupinus albus* L. under phosphate and iron stress. *Plant and Soil*, 232, 81-90.
82. Harlan J. R. et Wet J. M. J., 1971. Toward a rational classification of cultivated plants. Crop Evolution Laboratory, Agronomy Department, University of Illinois, Urbana, Illinois 61801, U.S.A. <https://doi.org/10.2307/1218252>
83. Harris D., et Natarajan, M., 1987. Physiological basis for yield advantage in a sorghum/groundnut intercrop exposed to drought. 2. Plant Temperature, water status, and components of yield. *Field Crops Research*, 17(3-4), 273–288. doi:10.1016/0378-4290(87)90040-2

84. Hauggaard-Nielsen H., Ambus P. et Jensen E.S., 2001. Temporal and spatial distribution of roots and competition for nitrogen in pea–barley intercrops— a field study employing 32P technique. *Plant Soil* 236, 63–74.
85. Hauggaard-Nielsen H., Jørgensen B., Kinane J. et Jensen E.S., 2007. Grain legume— cereal intercropping: the practical application of diversity, competition and facilitation in arable and organic cropping systems. *Renew. Agric. Food Syst.* 23, 3–12.
86. Hauggaard-Nielsen H., Gooding M., Ambus P., Corre-Hellou G., Crozat Y., Dahmann C., Dibet A., Fragstein P., Pristeri A., Monti M., et al. 2009. Pea–barley intercropping for efficient symbiotic N₂-fixation, soil N acquisition and use of other nutrients in European organic cropping systems. *Field Crops Research* 113:64–71.
87. Harmsen J., 2007. Measuring bioavailability: from a scientific approach to standard methods. *Journal of Environmental quality*, 36(5), 1420-1428.
88. Haynes R. J., 1980. Competitive Aspects of the Grass-Legume Association. *Advances in Agronomy*, 227–261. doi:10.1016/s0065-2113(08)60168-6
89. Hazmoune T., 2000. Erosion des variétés de blé dur cultivées en Algérie : perspectives. In : Royo C. (ed.), Nachit M. (ed.), Di Fonzo N. (ed.), Araus J.L. (ed.). Durum wheat improvement in the Mediterranean region: New challenges . Zaragoza : CIHEAM. p. 291-294 (Options Méditerranéennes : Série A. Séminaires Méditerranéens; n. 40)
90. He Y., Ding N., Shi J. C., Wu M., Liao H. et Xu J. M., 2013. Profiling of microbial PLFAs: Implications for interspecific interactions due to intercropping which increase phosphorus uptake in phosphorus limited acidic soils. *Soil Biology and Biochemistry* 57:625–34. doi:10.1016/j.soilbio.2012.07.027 .
91. Hinsinger P., 2001. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root induced chemical changes. *Plant Soil* 237, 173–195.
92. Hinsinger P., Plassard C., Tang C. et Jaillard B., 2003. Origins of root mediated pH changes in the rhizosphere and their responses to environmental constraints: A review. *Plant and Soil* 248 (1/2):43–59. doi:10.1023/A:1022371130939.
93. Hinsinger P., 2004. Nutrient availability and transport in the rhizosphere. *Encyclopedia of Plant and Crop Science*. Marcel Dekker, Inc., New York, USA, 1094-1097.
94. Hinsinger P., Betencourt E., Bernard L., Brauman A., Plassard C., Shen J. et Zhang F., 2011. P for two, sharing a scarce resource: Soil phosphorus acquisition in the rhizosphere of intercropped species. *Plant Physiology* 156 (3):1078–86. doi:10.1104/pp.111.175331 .

95. Hinsinger P., Jones D.L., Marschner P., 2012. Biogeochemical, biophysical and biological processes in the rhizosphere . Handbook of soil sciences, 2eme ed., CRC Press, 830p., 978-1-4398-0307-3. (hal-01268624)
96. Huang C. D., Liu Q. Q., Li X. L. et Zhang C. C., 2019. Effect of intercropping on maize grain yield and yield components. *Journal of Integrative Agriculture* 18 (8):1690–700. doi:10.1016/S2095-3119(19)62648-1 .
97. Ijoyah M. O., 2012. Review of intercropping research on cereal- vegetable based cropping system, *Scientific Journal of crop Science*, 1(3), 55-62.
98. ITGC, 2017. Rapport annuel de projet de coopération portant sur l’adaptation de l’agriculture de conservation en vue de l’adoption rapide par les agriculteurs en Afrique du nord. Compagne agricole 2016-2017.
99. Jackson R. B., Sperry J. S., et Dawson T. E., 2000. Root water uptake and transport: using physiological processes in global predictions. *Trends in plant science*, 5(11), 482-488.
100. Jaiswal R. et Singh N.P., 2001. Plant Regeneration from NaCl Tolerant Callus/Cell Lines of Chickpea, International Chickpea and pigeonpea Newsletter
101. Jensen, E.S., 1996. Grain yield, symbiotic N₂ fixation and interspecific competition for inorganic N in pea-barley intercrops. *Plant Soil* **182**, 25–38 [https : //doi.org/10.1007/BF00010992](https://doi.org/10.1007/BF00010992).
102. Jensen E. S., Peoples M. B. et Hauggaard-Nielsen H., 2010. Faba bean in cropping systems. *Field Crops Research*, 115(3), 203–216. doi:10.1016/j.fcr.2009.10.008
103. Jensen E. S., Peoples M. B., Boddey R. M., Gresshoff P. M., Hauggaard-Nielsen H., Alves B. et Morrison M. J., 2011. Legumes for mitigation of climate change and the provision of feedstock for biofuels and biorefineries. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 32(2), 329–364. doi:10.1007/s13593-011-0056-7
104. Jensen E.S., Bedoussac L., Carlsson G., Journet E.P., Justes E. et Hauggaard-Nielsen H., 2015. Enhancing yields in organic crop production by eco-functional intensification. *Sustainable Agriculture Research*. 4, 42–50.
105. Jensen E. S., Carlsson G. et Hauggaard-Nielsen H.. 2020. Intercropping of grain legumes and cereals improves the use of soil N resources and reduces the requirement for synthetic fertilizer N: A global-scale analysis. *Agronomy for Sustainable Development* 40 (1):5. doi:10.1007/s13593-020-0607-x .
106. Jeuffroy M. H., Baranger E., Carrouée B., de Chezelles E., Gosme M., Hénault C., Schneider A. et Cellier P., 2013. Nitrous oxide emissions from crop rotations including wheat, oilseed rape and dry peas. *Biogeosciences*, 10(3), 1787–1797. doi:10.5194/bg-10-1787-2013
107. Jeyabal A. et Kuppaswamy G., 2001. Recycling of organic wastes for the production of vermicompost and its response in rice–legume cropping system and soil fertility. *Eur. J. Agric.*, 153–170

108. Johnson A. E., 2000. Soil and plant phosphate. Ed. International Fertilizer Industry Association. 46p.
109. Jones D. L. et Hinsinger P., 2008. The rhizosphere: Complex by design. *Plant and Soil* 312 (1–2):1–6. doi:[10.1007/s11104-008-9774-2](https://doi.org/10.1007/s11104-008-9774-2) .
110. Kaci G., Blavet D., Benlahrech S., Kouakoua E., Couderc P., Deleporte P., Desclaux D., Latati M., Pansu M., Drevon J.J. et Ounane S.M., 2018. The effect of intercropping on the efficiency of faba bean – rhizobial symbiosis and durum wheat soil-nitrogen acquisition in a Mediterranean agroecosystem. *Plant Soil Environ.* 64: 138–146. doi:[10.17221/9/2018-PSE](https://doi.org/10.17221/9/2018-PSE) .
111. Kermah M., Franke A. C., Adjei-Nsiah S., Ahiabor B. D. K., Abaidoo R. C. et Giller K. E., 2018. N₂-fixation and N contribution by grain legumes under different soil fertility status and cropping systems in the Guinea savanna of northern Ghana. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 261:201–10. doi:[10.1016/j.agee.2017.08.028](https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.08.028) .
112. Kirouani A, Kiar R.O., Boukhalfoun L., Fellahi Z.A., 2019. Caractérisation de quelques variétés Algériennes de blé dur (*Triticum turgidum* L. var. durum) par le biais des marqueurs phénotypiques. *J. Appl. Biosci.* <https://dx.doi.org/10.4314/jab.v142i1.3>
113. Kupka J., Fojtik L. et Novak V., 1989. Changes in the nitrogen and phosphorus contents during the development of faba beans. In *Faba Bean Abstracts* 9 (3): 43
114. Lambers H., Shane M.W. , Cramer M.D. , Pearse S. J. et Veneklaas E.J., 2006. Root Structure and Functioning for Efficient Acquisition of Phosphorus : Matching Morphological and Physiological Traits. *Annals of Botany* 98: 693–713, doi:[10.1093/aob/mcl114](https://doi.org/10.1093/aob/mcl114)
115. Lambers H., 2022. Phosphorus acquisition and utilization in plants. *Annual Review of Plant Biology* 73 (1):17–42. doi:[10.1146/annurev-arplant-102720-125738](https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-102720-125738) .
116. Lamont B. B., 2003. Structure, ecology and physiology of root clusters—a review. *Plant and Soil*, 248, 1-19.
117. Latati M., 2014. Modélisation de la dynamique du carbone et de l’azote dans le système d’association légumineuses-céréales: Rôle fonctionnel de la symbiose rhizobienne dans le contrôle de la biodisponibilité du phosphore dans la rhizosphère. Thèse doctorat. ENSA, El Harrach alger. 185p.
118. Latati M., Bargaz A., Belarbi B., Lazali M., Benlahrech S., Tellah S., Kaci G., Drevon J.J., Ounane S.M., 2016. The intercropping common bean with maize improves the rhizobial efficiency, resource use and grain yield under low phosphorus availability. *European Journal of Agronomy*, 72: 80–90. doi:[10.1016/j.eja.2015.09.015](https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.09.015) .

119. Lazali M., Zaman-Allah M., Amenc L., Ounane G., Abadie J., et Drevon J. J., 2013. A phytase gene is overexpressed in root nodules cortex of *Phaseolus vulgaris*–rhizobia symbiosis under phosphorus deficiency. *Planta*, 238, 317-324.
120. Lazali M., 2014. Etude des mécanismes agrophysiologiques et moléculaires d'adaptation à la déficience en phosphore chez la symbiose rhizobienne du haricot (*Phaseolus vulgaris* L.). Thèse de doctorat. ENSA, El Harrach alger. 152 p .
121. Lazali M., Brahim S., Merabet C., Latati M., Benadis C, Maougal R., Blavet D., Drevon J.J. et Ounane S.M. 2016a. Nodular diagnostic of contrasting recombinant inbred lines of *Phaseolus vulgaris* in multi-local field tests under Mediterranean climate. *European Journal of Soil Biology* 73 / 100 – 107. doi:10.1016/j.ejsobi.2016.02.002 .
122. Lazali M., Blavet D., Pernot C., Desclaux D. et Drevon, J. J. 2016 b. Efficiency of Phosphorus Use for Dinitrogen Fixation Varies between Common Bean Genotypes under Phosphorus Limitation. *Agronomy Journal*, 109(1), 283. doi:10.2134/agronj2016.01.0034
123. Lazali M., et Bargaz A., 2017 a. Examples of belowground mechanisms enabling legumes to mitigate phosphorus deficiency. In *Legume nitrogen fixation in soils with low phosphorus availability*, ed. S. Sulieman and L. S. P. Tran, 135–52. Switzerland: Springer International Publishing.
124. Lazali M., Blavet D., Pernot C., Desclaux D. et Drevon J. J., 2017b. Efficiency of phosphorus use for dinitrogen fixation varies between common bean genotypes under phosphorus limitation. *Agronomy Journal* 109 (1):283–90. doi:10. 2134/agronj2016.01.0034 .
125. Lazali M., Brahim S. et Drevon J. J., 2018a. High yields in a low-P tolerant recombinant inbred line of common bean under field conditions. *Rhizosphere* 8:27–33. doi:10.1016/j.rhisph.2018.09.001 .
126. Lazali M., and Drevon J. J., 2018b. Role of acid phosphatase in the tolerance of the rhizobial symbiosis with legumes to phosphorus deficiency. *Symbiosis* 76 (3):221–28. doi:10.1007/s13199-018-0552-5.
127. Lazali M., Boudsocq S., Taschen E., Farissi M., Hamdi W., Ralli P. et Sentenac H., 2021a. CROSYMED project: Enhancing nutrient use efficiency through legumes in agro-ecosystems of the Mediterranean basin. *Sustainability* 13 (9):4695. doi:10.3390/su13094695 .
128. Lazali M. et Drevon J. J., 2021b. Mechanisms and adaptation strategies of tolerance to phosphorus deficiency in the rhizobial symbiosis with legumes. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 52 (13):1469–83. doi:10.1080/ 00103624.2021.1885693 .

129. Leggett M., Gleddie S., Holloway G., 2001. Phosphate-Solubilizing Microorganisms and Their Use. In: Ae, N., Arihara, J., Okada, K., Srinivasan, A. (eds) Plant Nutrient Acquisition. Springer, Tokyo. https://doi.org/10.1007/978-4-431-66902-9_13
130. Libaga A., Shen H., Shibata K., Yamamoto Y., Tanakamaru S. et Matsumoto H., 2004. The role of phosphorus in aluminium-induced citrate and malate exudation from rape (*Brassica napus*). *Physiol. Plant.* 120, 575-584
131. Lifshitz R., Kloepper J. W., Kozlowksi M., Simonson C., Carlson J., Tipping E. M. and Zaleska I., 1987. Growth promotion of canola (rapeseed) seedlings by a strain of *Pseudomonas putida* under gnotobiotic conditions. *Canadian Journal of Microbiology* 33, 390-395.
132. Li L., Tang C., Rengel Z., Zhang F., 2003. Chickpea facilitates phosphorus uptake by intercropped wheat from an organic phosphorus source. *Plant Soil* 248, 297–303.
133. Li L., Sun J., Zhang F. *et al.*, 2006. Root distribution and interactions between intercropped species. *Oecologia* 147,280–290. <https://doi.org/10.1007/s00442-005-0256-4>
134. Li L., Li S. M., Sun J. H., Zhou L. L., Bao X. G., Zhang H. G. et Zhang F. S., 2007. Diversity enhances agricultural productivity via rhizosphere phosphorus facilitation on phosphorus-deficient soils. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 104:11192–96.
135. Li L., Tilman D., Lambers H. et Zhang F. S., 2014. Plant diversity and overyielding: Insights from belowground facilitation of intercropping in agriculture. *New Phytologist* 203 (1):63–69. doi:10.1111/nph.12778 .
136. Li S.M., Li L., Zhang F. et Tang C., 2004. Acid phosphatase role in chickpea/maize intercropping. *Annals of Botany* 94, 297-303. doi:10.1093/aob/mch140
137. Li W.X., Li L., Sun J.H., Guo T.W., Zhang F.S., Bao X.G., Peng A. et Tang C., 2005: Effects of intercropping and nitrogen an application on nitrate present in the profile of an Orthic Anthrosol in Northwest China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 105: 483–491.
138. Li Y.Y., Yu C., Cheng X., Li C.J., Sun J.H., Zhang F.S., Lambers H. et Li L., 2009. Intercropping alleviates the inhibitory effect of N fertilization on nodulation and symbiotic N₂ fixation of faba bean. *Plant Soil*, 323, 295–308.
139. Liu A., Contador C.A., Fan K., Lam H.M., 2018. Interaction and Regulation of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus Metabolisms in Root Nodules of Legumes. *Front. Plant Sci.* 871, 1860.
140. Liu X., Rahman T., Yang F., Song C., Yong T., Liu J., et al. 2017. PAR interception and utilization in different maize and soybean intercropping patterns. *Plos*

- one. 12(1):e0169218. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169218> PMID: 28056056 10. doi:10.1371/journal.pone.0169218 .
141. Lithourgidis A. S., Vlachostergios D. N., Dordas C. A., Damalas C. A., 2011. Dry matter yield, nitrogen content, and competition in pea–cereal intercropping systems. *European Journal of Agronomy*, 34(4), 287–294. doi:10.1016/j.eja.2011.02.007
 142. Lompo F., Segda Z., Gnankambary Z., et Ouandaogo, N., 2009. Influence des phosphates naturels sur la qualité et la biodégradation d'un compost de pailles de maïs. *Tropicultura*, 27(2), 105-109.
 143. Longfei Zhao, Zhenshan Deng, Wenquan Yang, Ying Cao . Entao Wang, Gehong Wei, 2010. Diverse rhizobia associated with *Sophora alopecuroides* grown in different regions of Loess Plateau in China.
 144. López-Bucio J., Nieto-Jacobo M. F., Ramírez-Rodríguez V., et Herrera-Estrella L., 2000. Organic acid metabolism in plants: from adaptive physiology to transgenic varieties for cultivation in extreme soils. *Plant Science*, 160(1), 1–13. doi:10.1016/s0168-9452(00)00347-2
 145. Louarn G., Corre-Hellou G., Fustec J., Pelzer E., Julier B., et al, 2010. Déterminants écologiques et physiologiques de la productivité et de la stabilité des associations graminées légumineuses. *Innovations Agronomiques*, 11, pp.79-99. ff10.17180/41ch-qa28ff. ffhal-01173245f
 146. Louche J., 2009. Régulation de la sécrétion des phosphatases acides des champignons ectomycorhiziens et mobilisation de phosphore organique dans la rhizosphère des arbres forestiers : Approches biochimiques et moléculaires. Centre international d'études supérieures en sciences agronomiques. Mémoire de thèse p11.
 147. Lynch J. P., et Brown K. M., 2006. Whole plant adaptations to low phosphorus availability. *Plant–environment interactions*'. 3rd edn. (Ed. B Huang)(Taylor and Francis: New York).
 148. Mabrouk Y., Hemissi I., Salem I.B., Mejri S., Saidi M., Belhadj O., **2018**. Potential of rhizobia in improving nitrogen fixation and yields of legumes. *Symbiosis* 107, 73495.
 149. Madembo C., Mhlanga B. and Thierfelder C., 2020. Productivity or stability? Exploring maize-legume intercropping strategies for smallholder Conservation Agriculture farmers in Zimbabwe. *Agricultural Systems*, 185, 102921. doi:10.1016/j.agry.2020.102921
 150. MADR, 2020. Statistiques agricoles du ministère d'agriculture et de développement rural. Algérie.
 151. Maitra S., Hossain A., Brestic M., Skalicky M., Ondrisik P., Gitari H., Brahmachari K., Shankar T., Bhadra P., Palai J. B. et al., **2021**. Intercropping—A low input agricultural strategy for food and environmental security. *Agronomy* 11 (2):343. doi:10.3390/agronomy11020343 .

152. Marcussen T., Sandve S. R. , Heier L., Spannagl M., Pfeifer M. et al., 2014. Ancient hybridizations among the ancestral genomes of bread wheat. *Science* vol 345, NO. 6194. DOI: 10.1126/science.1250092.
153. Marguerie M., 2019. Michel Nevière, Lycée agricole Aix-Valabre. <https://www.bioprovence.org/Cereales-les-cultures-associees-une-voie-prometteuse-mais-delicate>
154. Marschner H., 1998. Mineral nutrition of higher plants. 2nd ed. Academic Press. London. 889.
155. Marra L.M., de Oliveira-Longatti S.M., Soares C.R.F.S., Olivares F.L., de Souza Moreira F.M., 2019. The Amount of Phosphate Solubilization Depends on the Strain, C-Source, Organic Acids and Type of Phosphate. *Geomicrobiol. J.* 36, 232–242.
156. Mengel K. et Kirby E. A., 2001. Chapter 9 Phosphorus. In *Principles of plant nutrition*. 5th edition. Ed. Kluwer Academic Publishers. Netherland. pp: 453:479.
157. Messaoudi H., Gérard F., Dokukin P., Djamai H., Rebouh N. Y. et Latati M., 2020. Effects of intercropping on field-scale phosphorus acquisition processes in a calcareous soil. *Plant and Soil* 449 (1–2):331–41. doi:10.1007/s11104-020-04491-7 .
158. Mnasri B., Mrabet M., Laguerre G. *et al.*, 2007. Salt-tolerant rhizobia isolated from a Tunisian oasis that are highly effective for symbiotic N₂-fixation with *Phaseolus vulgaris* constitute a novel biovar (bv. *mediterranense*) of *Sinorhizobium meliloti* . *Arch Microbiol* **187**, 79–85. <https://doi.org/10.1007/s00203-006-0173-x>
159. Morel C., 2023. Indicateurs fonctionnels et mécanistes pour évaluer le phosphore phytodisponible du sol. Revue AE&S 13-2 - Des référentiels agronomiques et des indicateurs pour la pratique agricole : comment faire face à la diversité des situations dans un contexte de transitions? INRAE, France
160. Mouradi M., Farissi M., Makoudi B., Bouizgaren A. et Ghoulam C., 2018. Effect of faba bean (*Vicia faba* L.)–rhizobia symbiosis on barley’s growth, phosphorus uptake and acid phosphatase activity in the intercropping system. *Annals of Agrarian Science* 16 (3):297–303. doi:10.1016/j.aasci.2018.05.003 .
161. Namatsheve T., Cardinael R., Corbeels M. et Chikowo R., 2020. Productivity and biological N₂-fixation in cereal-cowpea intercropping systems in sub-saharan Africa. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 40 (4):30. doi:10.1007/s13593-020-00629-0 .
162. Naudin C., Corre-Hellou G., Pineau S., Crozat Y. et Jeuffroy M. H., 2010. The effect of various dynamics of N availability on winter pea–wheat intercrops: Crop

- growth, N partitioning and symbiotic N₂ fixation. *Field Crops Research*, 119(1), 2–11. doi:10.1016/j.fcr.2010.06.002
163. Nemery J., 2018. Phosphore et eutrophisation, Encyclopédie de l'Environnement. en ligne ISSN 2555-0950 url : <https://www.encyclopedie-environnement.org/eau/phosphore-et-eutrophisation/>.
164. Neyra M., 1992. Fichier technique de la fixation symbiotique de l'azote legumineuse/Rhizobium.190
165. Nuruzzaman M., Lambers H., Bolland M.D.A. et al., 2006. Distribution of Carboxylates and Acid Phosphatase and Depletion of Different Phosphorus Fractions in the Rhizosphere of a Cereal and Three Grain Legumes. *PlantSoil* **281**, 109–120. <https://doi.org/10.1007/s11104-005-3936-2>
166. Ofori F. and Stern W.R., 1987. Cereal–Legume Intercropping Systems. J. Advances in Agronomy. Volume 41, 1987, Pages 41-90.[https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60802-0](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60802-0).
167. Olsen S. R., Cole C. V., Watanabe F. S. et Dean L. A., 1954. *Estimation of available phosphorus in soil by extraction with sodium bicarbonate*. Washington, USA: Circular. 939 USDA.
168. Ouedraogo E, Brussaard L, Mando A, Stroosnijder L. 2005. Organic resources and earthworms affect phosphorus availability to sorghum after phosphate rock addition in semi-arid West Africa. *Biol. Fert. Soils*, **41**: 458-465.
169. Ouedraogo J., Nacro H., Ouedraogo E., Youl S., et Sedogo M., 2015. Amélioration de la disponibilité du phosphore par la gestion de la macrofaune du sol : cas d'un lixisol en zone semi-aride du Burkina Faso. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 8(4), 1838. doi:10.4314/ijbcs.v8i4.41
170. Ozier-Lafontaine H., Lafolie F., Bruckler L. *et al.*, 1998. Modelling competition for water in intercrops: theory and comparison with field experiments. *Plant and Soil* **204**, 183–201. <https://doi.org/10.1023/A:1004399508452>
171. Pang J., Bansal R., Zhao H., Bohuon E., Lambers H., Ryan M. H., ... & Siddique K. H., 2018. The carboxylate-releasing phosphorus-mobilizing strategy can be proxied by foliar manganese concentration in a large set of chickpea germplasm under low phosphorus supply. *New Phytologist*, 219(2), 518-529.
172. Pankhurst C. E., et Lynch, J. M., 1995. *The role of soil microbiology in sustainable intensive agriculture*. *Advances in Plant Pathology*, 229–247. doi:10.1016/s0736-4539(06)80014-0
173. Pathan S. I., Ceccherini M. T., Sunseri F. et Lupini A., 2020. Rhizosphere as hotspot for plant-soil-microbe interaction. In *Carbon and nitrogen cycling in soil*, ed. R. Datta, R. S. Meena, S. I. Pathan, and M. T. Ceccherini, 17–43. Singapore: Springer.

174. Pearse S. J., Veneklaas E. J., Cawthray G. R., Bolland M. D. A. et Lambers H., 2006. Carboxylate release of wheat, canola and 11 grain legume species as affected by phosphorus status. *Plant and Soil* 288 (1–2):127–39. doi:10.1007/s11104-006-9099-y .
175. Peoples M.B., Brockwell J., Herridge D.F., Rochester I.J., Alves B.J.R., Urquiaga S., Boddey R.M., Dakora F.D., Bhattari S., Maskey S.L., Sampet C., Rerkesam B., Khan D.F., Hauggaard-Nielsen H. et Jensen E.S., 2009a. Review article. The contributions of nitrogen-fixing crop legumes to the productivity of agricultural systems. *Symbiosis* 48, 1–17.
176. Peoples M.B., Hauggaard-Nielsen H., et Jensen E.S., 2009b. Chapter 13. The potential environmental benefits and risks derived from legumes in rotations. In: Emerich, D.W., Krishnan, H.B. (Eds.), *Agronomy Monograph 52. Nitrogen Fixation in Crop Production* Am. Soc. Agron., Crop Sci. Soc. Am., and Soil Sci. Soc Am. Madison, Wisconsin, USA. pp. 349–385.
177. Plancquart et Werry, 1991. Chickpea: cultivation, use. Institut Technique des Céréales et des Fourrages, Paris(France).<https://agris.fao.org/search/en/providers/122439/records/6471e5ba2a40512c710e8873>
178. Pousset J., 2003. Engrais verts et fertilité des sols. 2ème Edition Agri décisions, Paris.
179. Raghothama K.G., 1999. Phosphate acquisition. *Annual Rev Plant Physiol Plant Molec Biol* 50: 665-693.
180. Raven P. H., Evert R. F., Eichlorn S. E., 2000. Biologie végétale. La 6ème Edition de boeck ,Paris.
181. Richardson A.E., Hocking P.J., Simpson R.J., George T.S., 2009. Plant mechanisms to optimize access to soil phosphorus. *Crop Pasture Sci* 60: 124-143.
182. Rieben S, Kalinina O, Schmid B, Zeller S.L., 2011. Gene Flow in Genetically Modified Wheat. *PLoS ONE* 6(12): e29730. doi:10.1371/journal.pone.0029730
183. Rifat Y., Ikramullah K., Anwar ul H., Syed A. A., 2010. Sebaceous granulomas: a novel feature of discoid lupus erythematosus. *International Journal of Pathology.*; 8 (1): 22-25
184. Roberts E.H., Summerfield R.J., Minchin F.R., et Haley P., 1980. Penology of chickpea (*Cicer arietinum* L.) In: *Contrasting aerial environments. Experimental Agriculture*; 16, 343-360 in AbadII, 1991).
185. Saccardo F., Calcagno F., 1990. Consideration of chickpea plant ideotypes for spring and winter sowing. In : Saxena M.C. (ed.), Cubero J.I. (ed.), Wery J. (ed.). *Present status and future prospects of chickpea crop production and improvement in the Mediterranean countries. Zaragoza : CIHEAM, 1990. p.35-41 (Options Méditerranéennes : Série A. Séminaires Méditerranéens; n. 9)*
186. Saxena M. C., 1990. Problems and Potential of Chickpea Production in the Nineties. *Ouvrage Chickpea in the Nineties: proceedings of the Second International*

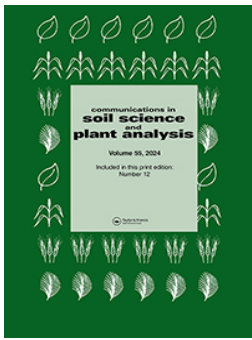
Workshop on Chickpea Improvement. 4-8 Dec 1989. ICRISAT Center. India. Palancheru. A.P. 502 324. India: ICRISAT. Page 13.

187. Schulze J, Drevon JJ., 2005. P-deficiency increases the O₂ uptake per N₂ reduced in alfalfa. *J Exp Bot* 56:1779-1784.
188. Seran T. H. et Brintha I., 2010. Review on maize based intercropping. *Journal of Agronomy*, 9(3), 135-145. <http://dx.doi.org/10.3923/ja.2010.135.145>
189. Serraj R., Krishnamurthy L., Kashiwagi J., Kumar J., Chandra S., et Crouch J. H., 2004. Variation in root traits of chickpea (*Cicer arietinum* L.) grown under terminal drought. *Field Crops Research*, 88(2-3), 115-127.
190. Sharma K.D., Muehlbauer F.J., 2007. Fusarium wilt of chickpea: physiological specialization, genetics of resistance and resistance gene tagging. *Euphytica* **157**, 1–14 <https://doi.org/10.1007/s10681-007-9401-y>
191. Shen Z.L., Liu Q., Zhang S.M., Miao H., Zhang P., 2001. The dominant controlling factors of high content inorganic N in the Changjiang River and its mouth (in Chinese). *Oceanol Limnol Sin* 32(5):465–473
192. Shimelis G. Raji, Vasileios T. and Dörsch P., 2019. Bradyrhizobial inoculation and P application effects on haricot and mung beans in the Ethiopian Rift Valley. *Plant and Soil* . Vol. 442, No. 1/2 (September 2019), pp. 271-284
193. Sifi B., et Drevon J. J., 2003. Fixation symbiotique de l'azote et développement durable dans le Bassin méditerranéen: Carthage (Tunisie), 13-16 octobre 1998; Montpellier (France), 9-13 juillet 2000.
194. Silim S.N. ET Saxena M.C., 1993. Adaptation of spring-sown chickpea to the Mediterranean basin. Response to moisture supply, *Field Crops Research*, 34: 121-136.
195. Singh K.B. et Reddy, M.V. 1991. Advances in disease resistance breeding in chickpea. *Advanced Agronomy*. 45:191-222.
196. Singh K.B. 1997. Chickpea (*Cicer arietinum* L.) .*Field crops research*, 53(1-3): 161-170.
197. Singh K., Ocampo B., 1997. Exploitation of wild *Cicer* species for yield improvement in chickpea. *Theor Appl Genet* **95**, 418–423. <https://doi.org/10.1007/s001220050578>
198. Singh K. K., Singh D., Dheer V., Singh J., Kumar A., Sachan K., Yadav A., Tiwari T., and Kumar R., 2024. “Responses of Phosphorus and Zinc on Growth and Yield in Chickpea (*Cicer Arietinum* L.)”. *International Journal of Environment and Climate Change* 14 (1):400-408. <https://doi.org/10.9734/ijecc/2024/v14i13848>.
199. Sinoquet H., Rakocevic M., & Varlet-Grancher C., 2000. *Comparison of models for daily light partitioning in multispecies canopies. Agricultural and Forest Meteorology*, 101(4), 251–263. doi:10.1016/s0168-1923(99)00172-0
200. Slama F., 1998. Cultures industrielles et légumineuses à graines. Ed. Centre de diffusion Universitaire Tunisie, en Arabe; 300 p.
201. Soltani A, Khodarahmpour Z, Jafari AA, Nakhjavan S (2012) Selection of alfalfa (*Medicago sativa* L.) cultivars for salt stress tolerance using germination indices. *Afr J Biotech* 11:7899–7905.

202. Srinivasarao C., Ganeshamurthy A. N., Ali M., et Venkateswarlu B., 2006. Phosphorus and micronutrient nutrition of chickpea genotypes in a multi-nutrient-deficient typical ustochrept. *Journal of Plant Nutrition*, 29 (4), 747-763.
203. Stevenson J.F., 1984. Humus Chemistry, genesis, composition, reactions. John Wiley & son, New York.
204. Stevens G.G., Pérez-Fernández M.A., Morcillo R.J.L., Kleinert A., Hills P., Brand D.J., Steenkamp E.T., Valentine A.J., 2019. Roots and Nodules Response Differently to P Starvation in the Mediterranean-Type Legume *Virgilia Divaricata*. *Front. Plant Sci.* 10, 73.
205. Tanner W., et Caspari T., 1996. Membrane transport carriers. *Annual Review of Plant Biology*, 47(1), 595-626.
206. Thompson L.M., et Troeh F.R., 1973. Soils and Soil Fertility. Mc Graw-Hill, Montreal. 495p.
207. Tang C., Hinsinger P., Jaillard B., Rengel Z., et Drevon J. J., 2001. Effect of phosphorus deficiency on the growth, symbiotic N₂ fixation and proton release by two bean (*Phaseolus vulgaris*) genotypes. *Agronomie*, 21 (6-7), 683-689.
208. Tang C., Drevon J. J., Jaillard B., Souche G., et Hinsinger P., 2004. Proton release of two genotypes of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) as affected by N nutrition and P deficiency. *Plant and Soil*, 260(1), 59-68.
209. Tang X., Bernard L., Brauman A., Daufresne T., Deleporte P., Desclaux D., Souche G., Placella S. A. et Hinsinger P., 2014. Increase in microbial biomass and phosphorus availability in the rhizosphere of intercropped cereal and legumes under field conditions. *Soil Biology and Biochemistry* 75:86–93. doi:10.1016/j.soilbio.2014.04.001 .
210. Taulemesse F, Le Gouis J, Gouache D, Gibon Y, Allard V., 2015. Post-Flowering Nitrate Uptake in Wheat Is Controlled by N Status at Flowering, with a Putative Major Role of Root Nitrate Transporter NRT2.1. *PLoS ONE* 10(3): e0120291. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0120291>
211. Tiessen H., 2008. Phosphorus in the global environment. In *The ecophysiology of plant-phosphorus interactions* (pp. 1-7). Dordrecht: Springer Netherlands.
212. Ullrich-Eberius C. I., Novacky A., Fischer E., et Lüttge U., 1981. Relationship between energy-dependent phosphate uptake and the electrical membrane potential in *Lemna gibba* G1. *Plant Physiology*, 67(4), 797-801.
213. Upadhyaya K.P., and Chapai A., 2024, Optimizing chickpea (*Cicer arietinum* L.) yield through balanced fertilization strategies, *International Journal of Horticulture*, 14(2): 53-59 (doi: [10.5376/ijh.2024.14.0007](https://doi.org/10.5376/ijh.2024.14.0007))
214. Vadez V., Beck D. P., Lasso J. H., Drevon J.J., 1997. Utilization of the acetylene reduction assay to screen for tolerance of symbiotic N₂ fixation to limiting P nutrition in common bean. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1997.tb05406.x>.

215. Vadez V., Lasso J. H., Beck D. P., et Drevon, J. J., 1999. Variability of N₂-fixation in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under P deficiency is related to P use efficiency. *Euphytica*, 106, 231-242.
216. Vail S. L., 2005. Population studies of *ascochyta rabiei* on chickpea in Saskatchewan. Thèse de Doctorat. Department of Plant Sciences. University of Saskatchewan. Saskatoon. 115p.
217. Valentine A.J., Kleinert A., Benedito V.A., 2017. Adaptive Strategies for Nitrogen Metabolism in Phosphate Deficient Legume Nodules. *Plant Sci.* 256, 46–52.
218. Valizadeh G.R., Rengel Z. et Rate A.W., 2003. Response of wheat genotypes efficient in P utilization and genotypes responsive to P fertilization to different P banding depths and watering regimes. *Australian Journal of Agricultural Research*. 54, 59–65. doi:10.1071/AR02040 .
219. Vance C.P., 2001. Symbiotic nitrogen fixation and phosphorus acquisition. Plant nutrition in a world of declining renewable resources. *Plant Physiol* 127: 390-397.
220. Vance C. P., Uhde-Stone C., et Allan D. L., 2003. Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. *New Phytologist*, 157(3), 423–447. doi:10.1046/j.1469-8137.2003.00695.x
221. Vandermeer J., 1989. *The Ecology of Intercropping*. *The Journal of Applied Ecology*, 26(3), 1107. Cambridge university press, Cambridge. doi:10.2307/2403737
222. Vandermeer J. H., 2011. The ecology of agrosystems. *Massachusetts, Jones and Bartlett Publishers*.
223. Van der Maesen L.G.J., 1987. Origin, history and taxonomy of Chickpea. Department of Taxonomy, Agricultural University, Wageningen, The Netherlands.
224. Vessey J.K., Chemining G.N., 2006. The genetic diversity of *Rhizobium leguminosarium* bv. *Viciae* in cultivated soils of the eastern Canadian prairie. *Soil Biology & Biochemistry* 38
225. Voisin A. S., Guéguen J., Huyghe C., Jeuffroy M. H., Marie-Benoît Magrini M. B., Meynard J. M., Mougél C., Pellerin S. et Pelzer E., 2013. Les légumineuses dans l'Europe du XXI^e siècle : Quelle place dans les systèmes agricoles et alimentaires actuels et futurs ? Quels nouveaux défis pour la recherche ?. *Innovations Agronomiques, INRAE*. 30, pp.283-312. fahal-01005055v1f
226. Von Felten S., Hector A., Buchmann N., Niklaus P. A., Schmid B., et Scherer-Lorenzen M., 2009. Belowground nitrogen partitioning in experimental grassland plant communities of varying species richness. *Ecology*, 90(5), 1389-1399.
227. Wang Y., Zhi H., Li W. *et al.*, 2009. A novel genome of C and the first autotetraploid species in the *Setaria* genus identified by genomic *in situ* hybridization. *Genet Resour Crop Evol* 56, 843–850 <https://doi.org/10.1007/s10722-009-9405-7>
228. Wang Z., Bao X., Li X., Jin X., Zhao J., Sun J., Christie P. et Li L., 2014. Intercropping maintains soil fertility in terms of chemical properties and enzyme activities

- on a timescale of one decade. *Plant Soil*, <http://dx.doi.org/10.1007/s11104-015-2428-2>.
229. Wang Y. et Lambers H., 2020. Root-released organic anions in response to low phosphorus availability: Recent progress, challenges and future perspectives. *Plant and Soil* 447 (1–2):135–56. doi:10.1007/s11104-019-03972-8.
230. Wery J., Turc O. et Salsac L., 1986. Relationship between growth, nitrogen fixation and assimilation in a legume (*Medicago sativa* L.). *Plant Soil* **96**, 17–29 <https://doi.org/10.1007/BF02374992>
231. Wery J., 1990. Adaptation to frost and drought stress in chickpea and implications in plant breeding. In : Saxena M.C. (ed.), Cubero J.I. (ed.), Wery J. (ed.). Present status and future prospects of chickpea crop production and improvement in the Mediterranean countries. Zaragoza : CIHEAM, p. 77-85 (Options Méditerranéennes : Série A. Séminaires Méditerranéens; n. 9)
232. Wichern F., Eberhardt E., Mayer J., Joergensen R.G., Müller T., 2008. Nitrogen rhizodeposition in agricultural crops: methods, estimates and future prospects, *Soil Biol. Biochem.* 40, 30–48.
233. Willey R.W. 1979. Intercropping-its importance and its research needs. Part 1. Competition and yield advantages. Part 11. Agronomic relationships. *Field Crop Abstracts* 32.
234. Xue Y., Xia H., Christie P., Zhang Z., Li L. et Tang C., 2016. Crop acquisition of phosphorus, iron and zinc from soil in cereal/legume intercropping systems: A critical review. *Annals of Botany* 117 (3):363–77. doi:10.1093/aob/mcv182
235. Zapata E., & Roy, R. N., 2004. Utilisation des phosphates naturels pour une agriculture durable. *Bulletin FAO*. P 25-29.
236. Zerihun A., 2017. On-Farm Yield Variability and Responses of Common Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) Varieties to Rhizobium Inoculation with Inorganic Fertilizer Rates. *J. Anim. Plant Sci.*, 32, 5120–5133.
237. Zhang F.S., Li L., 2003. Using competitive and facilitative interactions in intercropping systems enhances crop productivity and nutrient-use efficiency. *Plant and Soil*, 248: 305–312. doi:10.1023/A:1022352229863 .
238. Zhang D., Sun Z., Feng L., Bai W., Yang N., Zhang Z., Du G., Feng C., Cai Q., Wang Q., Zhang Y., Wang R., Arshad A., Hao X., Sun M., Gao Z. et Zhang, L., 2020. Maize plant density affects yield, growth and source-sink relationship of crops in maize/peanut intercropping. *Field Crops Research* 257:107926. doi:10.1016/j.fcr.2020.107926.
239. Zine-Zikara F., Bouzid L. et Yekkour A., 2015. Le pois chiche en algérie : Situation, potentialités et perspectives. INRAA, Laboratoire des ressources phytogénétiques, CRP Mehdi Boualem, Baraki, Alger. PP 35-47.
240. Zohary D et Hopf M, 2000. Pulses, in domestication of plants in the old world. Pp 108 111 (Clarendon press : oxford).



Intercropping Chickpea with Durum Wheat Enhances Nutrient Uptake and Grain Yield Under Low Phosphorus Availability

Hadjira Chahih, Jean Jacques Drevon & Mohamed Lazali

To cite this article: Hadjira Chahih, Jean Jacques Drevon & Mohamed Lazali (2024) Intercropping Chickpea with Durum Wheat Enhances Nutrient Uptake and Grain Yield Under Low Phosphorus Availability, Communications in Soil Science and Plant Analysis, 55:12, 1733-1746, DOI: [10.1080/00103624.2024.2328618](https://doi.org/10.1080/00103624.2024.2328618)

To link to this article: <https://doi.org/10.1080/00103624.2024.2328618>



Published online: 11 Mar 2024.



Submit your article to this journal [↗](#)



Article views: 109



View related articles [↗](#)



View Crossmark data [↗](#)



Intercropping Chickpea with Durum Wheat Enhances Nutrient Uptake and Grain Yield Under Low Phosphorus Availability

Hadjira Chahih^{a,b}, Jean Jacques Drevon^c, and Mohamed Lazali^a

^aLaboratoire de recherche ERP, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre. Université de Khemis Miliana, Ain Defla, Algérie; ^bLaboratoire d'Agronomie et Environnement, Faculté des Sciences et Technologies. Université Ahmed Ben Yahya El Wencharissi, Tissemsilt, Algérie; ^cUniversité de Montpellier, UMR Ecologie Fonctionnelle & Biogéochimie des Sols et Agroécosystèmes, INRAE-IRD-CIRAD-SupAgro. Place Pierre Viala, Montpellier, France

ABSTRACT

Intercropping is a traditional farming system that increases crop diversity to strengthen agroecosystem functions while decreasing chemical inputs and minimizing negative environmental effects of crop production. However, the effect of intercropping legume-cereal in enhancing nutrient uptake and use efficiency under low phosphorus (P) soils is poorly understood. Growth, nodulation, P uptake and use efficiency, and changes in inorganic P availability in the rhizosphere of intercropped species were thus investigated in a field experiment with durum wheat and chickpea either grown alone or intercropped. The results showed that both plant biomass and grain yield, and consequently, the amount of P uptake by intercropped durum wheat increased significantly (30%, 12%, and 46%, respectively) compared with sole cropping during the two seasons. P availability increased in the rhizosphere of the two species, either grown as sole crops or as intercrops, and was enhanced by intercropping. Moreover, total biomass, grain yield, and P uptake were significantly improved, as indicated by higher land equivalent ratio (LER > 1) in intercropping over sole cropping treatments. The increased biomass and grain yield for intercropped durum wheat were associated with the stimulation of P absorption and use efficiency. Furthermore, intercropped wheat was more competitive than their respective chickpea over two growing seasons. The results of this study suggest that changes in the intercropped chickpea rhizosphere may enhance plant growth, P uptake, and use efficiency of the intercropped wheat under low-P soils.

ARTICLE HISTORY

Received 10 January 2022
Accepted 5 March 2024

KEYWORDS

Intercropping; legumes; nutrient uptake; phosphorus; rhizosphere

Introduction

Nutrient availability and uptake are critical limiting factors for crop growth and yield in low-input agro-ecosystems (Lazali et al. 2021). With the increasing global demand for agricultural and food products, the development of new sustainable agricultural strategies to exploit soil resources effectively especially phosphorus (P) has become an interesting priority. It has been estimated that 5.7 billion hectares of land worldwide are deficient in P. Concentrations of phosphate in soil solutions are generally <10 mM, which are well below the critical level that is needed for the optimal performance of crops (Lambers 2022). This problem of P-deficiency might be mitigated by the application of concentrated fertilizers that provide soluble P for plants. This practice, however, is inherently inefficient due to chemical immobilization of P and agricultural run-off (Hinsinger et al.

CONTACT Mohamed Lazali ✉ mohamed.lazali@gmail.com 📧 Laboratoire de recherche ERP, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie & des Sciences de la Terre. Université Djilali Bounaama de Khemis Miliana, Route Theniet El Had, Soufay, Ain Defla, Khemis Miliana 44225, Algérie

2011). Furthermore, in intensive systems up to 80% of applied P can become immobilized in the soil through the processes of precipitation and adsorption (Lazali and Bargaz 2017), forcing farmers to apply up to five times the P fertilizer required by the crop and resulting in P loading of agricultural soils. Crucially, the long-term sustainability of applying P fertilizers is also highly questionable with world reserves of high-quality rock phosphate, from which they are derived, depleting rapidly (Dawson and Hilton 2011).

Some studies have demonstrated that intercropping is a strategy that can achieve high yield with good quality (Jensen, Carlsson, and Hauggaard-Nielsen 2020). Intercropping is defined as the simultaneous cultivation of more than one crop in the same area and time (Zhang et al. 2020). This cropping pattern is a very well-known agricultural system in developing countries, providing more than 15% of the food for humans and livestock (Liu et al. 2017). Its importance is based on achieving higher yield, enhancing resource use efficiency, improving soil conservation, controlling weeds, insects, and diseases compared with monoculture (Madembo, Mhlanga, and Thierfelder 2020). One of the sustainable practices for species diversification is the re-introduction of N₂-fixing legumes into cropping systems. Legumes can create symbiotic relationships with N₂-fixing rhizobia and arbuscular mycorrhizal fungi that facilitate the acquisition of nutrients and thus, reduce the use of synthetic fertilizers, which is advantageous for sustainable agriculture (Lazali et al. 2017). Interactions between microbes and plants in the rhizosphere may result in either harmful or beneficial effects (Pathan et al. 2020). These effects of microorganisms depend on several factors such as the microbial strains involved, the plant species, and the type of interaction (Jones and Hinsinger 2008). Several microorganisms are commonly used as biofertilizers, including N₂-fixing soil bacteria, phosphate-solubilizing bacteria, phytohormone (auxin)-producing bacteria, etc. (Chamkhi et al. 2021).

Cereal-legume intercropping is considered a sustainable agricultural production system (Huang et al. 2019) and has significant advantages over other systems in terms of yield and nutrient uptake (Zhang et al. 2020), mainly due to its efficient utilization of natural resources (Lazali et al. 2021). Cereal-legume intercropping affects the bioavailability of nutrients such as P, Fe, Zn, and Mn, increasing their acquisition by the intercropped species (Li et al. 2014). Different crop species differ in their capacity to mobilize or access soluble inorganic forms of these elements and intercropping of different species can mobilize and increase acquisition for both species involved in the intercropping system. Most work on bioavailability of nutrients has focused on P as this is a major element limiting crop productivity due to low bioavailability in soil. Intercropping has been shown to increase the acquisition of P from sparingly soluble P in soils or other culture substrates in a wide range of systems including pot, rhizobox, and hydroponic experiments, and under field conditions (Xue et al. 2016). The increase in P acquisition in intercrops can be due to higher P acquisition from poorly available organic sources or inorganic forms such as oxide and hydroxide complexes (Lazali et al. 2021). Several legume species excrete organic acids or H⁺ in their rhizosphere, enhancing the availability of P in the soil solution. Species with the ability to excrete organic acids include lupine, pigeon pea, chickpea, peanut, and faba beans, whereas most N₂ fixing legumes will acidify the rhizosphere, due to an imbalance in the acquisition of cations and anions. Intercropping these P solubilizing species with species that do not have this capacity enhances P acquisition of the latter (Li et al. 2004). The mobilizing plant species release protons in surplus (Hinsinger et al. 2003) and/or carboxylates (Pearse et al. 2006) that solubilize the inorganic phosphate forms (Li et al. 2014) that can be recovered by the intercropped species on soils with low soil P availability (Li et al. 2007). This acidification is most likely of special importance on calcareous soils.

In many regions devoted to cereal crops in Algeria, the use of grain legumes is limited because of the low availability of soil P, which strongly affects biological N₂ fixation (Lazali, Brahimi, and Drevon 2018). To better understand how mixed crops mitigate stressful conditions, this study aims at highlighting the beneficial effect of intercropping legume-cereal in enhancing soil-P availability for plant growth and productivity in a P-deficient soil of a northern Algerian agro-ecosystem. The primary objective was to investigate the positive impact of intercropping legumes and cereals on enhancing availability of P in the soil, thereby promoting optimal plant growth and maximizing agricultural

productivity. By examining the intricate dynamics of two co-cultivated species within a P-deficient soil found in the agricultural ecosystem of northern Algeria, we aimed to unravel the synergistic and competitive relationships between these plants. This study sought to unveil the underlying mechanisms through which intercropping legumes and cereals could effectively harness the complementary utilization of nutrients and minimize resource competition, ultimately leading to improved crop yield and overall sustainability of the agricultural system. Furthermore, the knowledge gained from this study may pave the way for innovative approaches to enhance soil fertility, crop performance, and overall agricultural sustainability. In this case, this study is based on the main assumptions. Those combinations of legume-cereals will improve P soil availability, resulting in improved plant growth and increased agricultural productivity compared to pure cultivation. Thus, nutrients use complementary between legumes and cereals in intercropping system will minimize resource competition. Also, assuming that intercropping will demonstrate superior soil fertility, crop performance, and overall agricultural sustainability compared to sole cropping practices. By conducting experiments and analyzing data, this study aimed to test these hypotheses and provide empirical evidence of this positive impact. These results would contribute to a better understanding of intercropping dynamics and provide practical information to optimize agricultural practices in P-poor soils.

Materials and methods

Experimental site and climatic conditions

The study was carried out during two growing seasons 2018 and 2019 under field conditions in the Tissemsilt region, northwest of Algiers (35°86.57'N, 1°99.13'E, 1220 m). Field trials were started in late December and harvested in late June during two growing seasons. The climate is characterized by cold winter with an irregular distribution of rainfall. The mean annual rainfall at this site was 615 mm in 2018 and 350 mm in 2019. The mean annual temperature over the two growing seasons was 19.7°C with mean minimal values of 12.8°C in January and mean maximal values of 22.5°C in July and August. During the two-year experiment, the coldest period was from December to February, with minimum temperatures recorded of 5.2°C and 3.7°C respectively on January in 2018 and 2019 growing seasons.

The physicochemical properties of topsoil were determined before sowing during the first growing season and were measured on soil samples that were collected by Auger at a depth of 0–20 cm. Physicochemical soil properties of the experimental site showed that the clay fraction (42%) was higher compared with both silt (33%) and sand (25%) proportions. The topsoil was alkaline (pH 7.90), with 181 g kg⁻¹ CaCO₃ and a low organic matter content (1.71%). This site was characterized by the availability of low-P soils (Olsen P, 7.52 mg P kg⁻¹).

Cropping system and field plot design

The field experiment was carried out using one chickpea cultivar (*Cicer arietinum* L. cv. Flip 93-93C) and one durum wheat cultivar (*Triticum durum* L. cv. Simeto) that are commonly cultivated by Algerian farmers. They were intercropped and grown separately over two growing seasons adopting a randomized block design that covered an area of 150 m². The field trial was divided into three blocks, each block is further divided into three plots. Each plot was used for one of the following three cropping systems: chickpea as sole crop, durum wheat as sole crop, and durum wheat-chickpea as intercrops. The plant density was chosen according to the local standard cropping practices. For durum wheat, the sowing density was 350 plants per m² for monocrops and 250 plants per m² for intercrops with 25 cm spacing between rows. For chickpea, the sowing density was 30 plants per m² with a spacing of 20 cm between plants and 25 cm between rows for both monocrops and intercrops. The two species were sown in the same row to maximize root proximity and chickpea-wheat rhizosphere interactions. For crop management, the field trial was carried out under rain-fed conditions

and without additional irrigation. Fertilizers and herbicide treatments were not applied during the two growing seasons.

Plant and soil sampling and measurements

At the full flowering stage for chickpea (120 days after sowing), we randomly harvested six plants for each crop treatment in the middle of each plot. Shoots were separated from the roots at the cotyledonary node, dried for 48 h at 65°C, and then weighed. The nodules were separated from the roots, dried, and weighed separately. At complete maturity (185 days after sowing for chickpea and 195 days after sowing for durum wheat), the grain yield for both chickpea and durum wheat was determined by harvesting all the plants within 1 m², excluding the outer rows. The grains were air-dried, and grain yields were calculated in g m⁻² and converted to q ha⁻¹.

Samples of the bulk soil were taken as a control and were compared to the soil which was taken from both chickpea and durum wheat rhizosphere. Samples of the soil rhizosphere were also carefully detached from the roots of both species. All the soil samples were air-dried, sieved (2 mm), and stored at 4°C for 2–3 days until analysis. Soil-P availability was determined by extraction in NaHCO₃ (Olsen et al. 1954), and total P concentration in the plants (shoots and roots) was determined using the malachite green method (Valizadeh, Rengel, and Rate 2003). Plant P uptake corresponded to the amount of nutrients taken up by plants during plant growth and were calculated as follows: P uptake = (P concentration in shoot × Shoot dry weight) + (P concentration in root × root dry weight) – seed P content (Lazali et al. 2021).

After carrying out P analysis in plant parts, P use efficiency was defined as total dry biomass per unit of P uptake, while P absorption efficiency is the relation between P uptake and P available which reflects plant's ability to extract P from soil (Lazali et al. 2017) according to the following formula:

$$\text{Phosphorus use efficiency} = \frac{\text{Total dry weight}}{\text{Phosphorus uptake}} \quad (1)$$

$$\text{Phosphorus absorption efficiency} = \frac{\text{Phosphorus uptake}}{\text{Phosphorus availability}} \quad (2)$$

Land equivalent ratio

Land Equivalent Ratio (LER) indicates yield advantage in intercrop as compared to monocropping system under similar unit area between the two systems. LER was calculated as follows:

$$\text{LER} = \frac{Y_{ab}}{Y_{aa}} + \frac{Y_{ba}}{Y_{bb}} \quad (3)$$

where Y_{aa} is the parameter for species “a” as a sole crop; Y_{bb} is the parameter for species “b” as a sole crop; Y_{ab} is the parameter for species “a” intercropped with species “b,” and Y_{ba} is the parameter for species “b” intercropped with species “a.” LER was determined for biomass, grain yield, and P uptake.

Competitive ratio

In an intercropping system, competitive ratio (CR) denotes the competitive ability of the component species. The CR expresses the number of times by which one component crop is more competitive than the other and CR actually represents the proportion of individual LERs of the crops considered in intercropping and also takes into account the ratio of the crops sown in a mixed stand. It was calculated according to the following formula (Lithourgidis et al. 2011).

$$CR_a = \frac{LER_a}{LER_b} \times \frac{Z_{ba}}{Z_{ab}} \quad (4)$$

$$CR_b = \frac{LER_b}{LER_a} \times \frac{Z_{ab}}{Z_{ba}} \quad (5)$$

where CR_a and CR_b are indicative of the competitive ratios of the crop species “a” and “b” and LER_a and LER_b are the LERs of the crop species “a” and “b,” respectively. Z_{ab} is the sown ratio of species “a” in mixture with “b” and Z_{ba} is the sown proportion of the species “b” in mixture with “a.” If the value of CR is <1 , there is a positive benefit and it means there is limited competition between component crops and therefore they can be grown as intercrops. If the CR value is greater than one ($CR > 1$), there is a negative impact.

Data analysis

The effects of the cropping system and growing season on plant biomass, P uptake, P availability in the rhizosphere, and grain yield were determined using analysis of variance (ANOVA) at a significance of p -value = .05, and Tukey’s test was used to determine whether the difference between mean values for each treatment was significant (Brahimi et al. 2022). The statistical analyses were performed using the package stats of R software 2.15.1 developed by the R Foundation for Statistical Computing.

Results

Plant growth, nodulation, and grain yield

Nodulation of chickpea varied according to crop treatments and growing seasons (Figure 1). Nodule growth significantly increased when chickpea was grown as intercropped, although this increase was more pronounced in 2019 (64%) compared to 2018 (26%).

Figure 2 shows the effect of intercropping on shoot and root biomass of both species during two growing seasons. For chickpea, the shoot DW was lower for the intercrops ($3.05 \text{ g plant}^{-1}$) than for

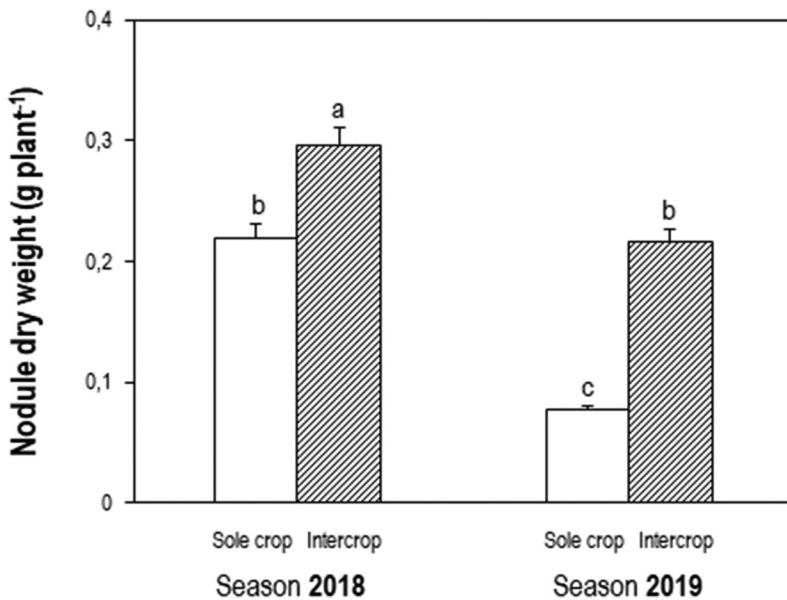


Figure 1. Nodule dry weight of chickpea grown as sole crop and intercrop through two growing seasons 2018 and 2019. Values represent the mean of six replicates \pm standard errors.

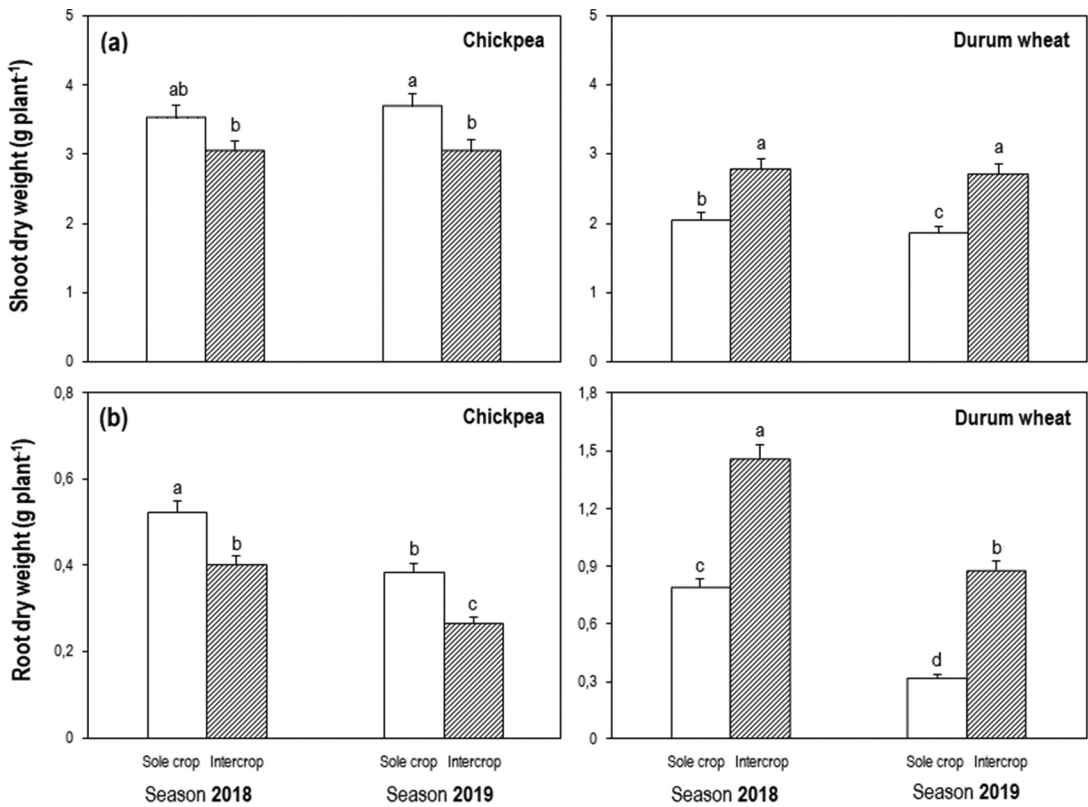


Figure 2. Shoot (a) and root (b) dry weight of chickpea and durum wheat grown as sole crop and intercrop through two growing seasons 2018 and 2019. Values represent the mean of six replicates \pm standard errors.

sole crops ($3.61 \text{ g plant}^{-1}$) over two seasons, but this difference was not significant for 2018. In contrast, durum wheat shoot DW was significantly increased by 32% in 2019 and 27% in 2018 when grown as intercropped (Figure 2a). Regarding root growth (Figure 2b), it was significantly increased in intercrops than in sole crops only for durum wheat. However, this increase was greater in 2019 (64%) compared to 2018 (46%). The grain yield of both crops was also affected by cropping systems and growing seasons (Figure 3). Indeed, the grain yield of durum wheat was significantly higher for intercropping (9% in 2018 and 15% in 2019), while it was significantly lower for intercropped chickpea over two seasons.

Phosphorus concentration and uptake

The P concentration in shoots and roots and P uptake by durum wheat and chickpea grown as intercrops and monocrops are reported in Table 1. For chickpea, intercropping significantly decreased the P concentration and uptake over two growing seasons (Table 1). In contrast, P concentration in shoots was significantly increased when durum wheat was grown as intercropped, although this increase was greater in 2019 (23%) as compared to 2018 (16%). The same was observed for the intercropped durum wheat with 16% and 13% increase in root P concentration in 2018 and 2019, respectively. Likewise, P uptake was increased by 43% and 50% in 2018 and 2019, respectively, when durum wheat was grown as intercropped.

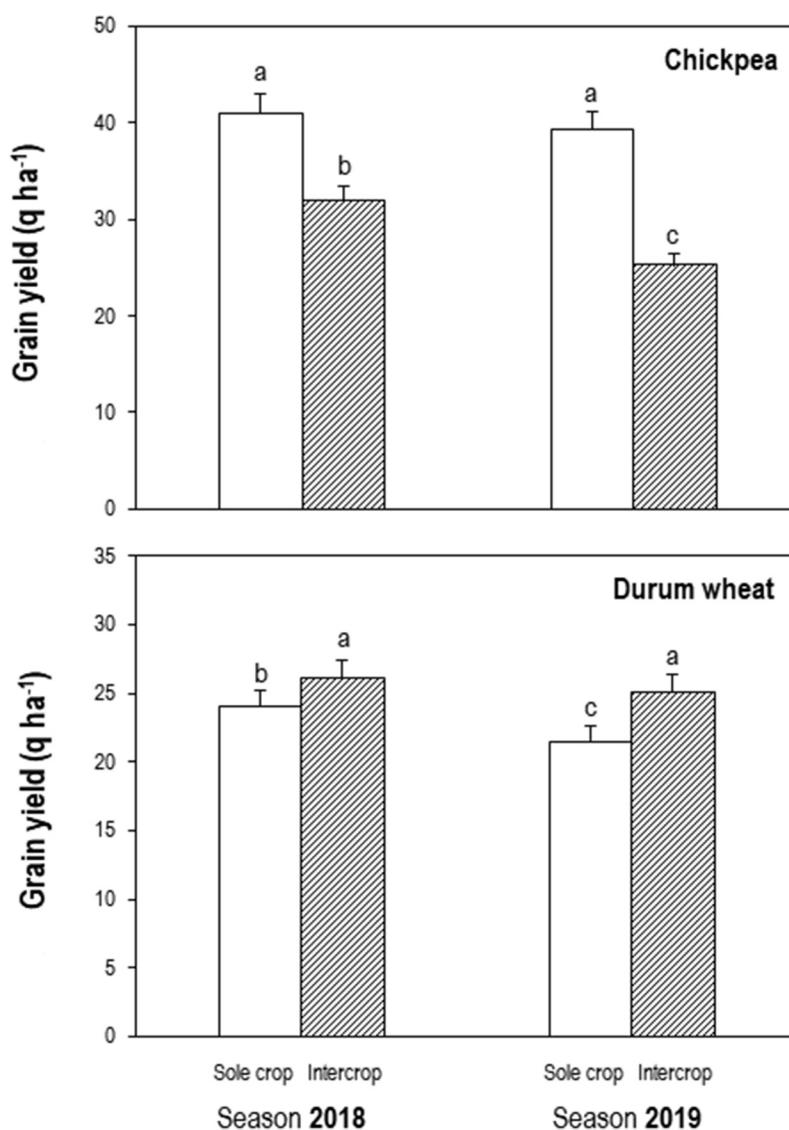


Figure 3. Grain yield of chickpea and durum wheat grown as sole crop and intercrop through two growing seasons 2018 and 2019. Values represent the mean of six replicates \pm standard errors.

Rhizosphere phosphorus availability

Figure 4 shows the Olsen-P concentration values measured in the control soil without plant (i.e. bulk soil) and in the rhizosphere of both species grown either as sole crop or intercropped. The Olsen-P concentration in the rhizosphere of chickpea for both intercrops and sole crops was higher than in the bulk soil, and this effect was more pronounced in 2019 (23%) than in 2018 (11%). Also, durum wheat significantly increased its rhizosphere Olsen-P concentration when grown as a sole crop (only in 2019) and intercropped with chickpea, compared to bulk soil.

Phosphorus absorption and use efficiency

The data in Table 2 show that the cropping system significantly influenced P absorption and use efficiency for both species grown as sole crops and intercrops. For chickpea, P use efficiency was

Table 1. Phosphorus concentration in shoots and roots and P uptake by whole plants for chickpea and durum wheat grown as sole crop and intercrop through two growing seasons in 2018 and 2019. Values represent the mean of six replicates \pm standard errors. The mean values labeled with the same letter were not significantly different at $p < .05$.

Growing season	Crop treatment	Chickpea			Durum wheat		
		Shoot P concentration (mg g ⁻¹)	Root P concentration (mg g ⁻¹)	P uptake (mg plant ⁻¹)	Shoot P concentration (mg g ⁻¹)	Root P concentration (mg g ⁻¹)	P uptake (mg plant ⁻¹)
2018	Sole crop	6.28 \pm 0.21 a	7.87 \pm 0.12 a	0.26 \pm 0.01 a	6.59 \pm 0.20 b	4.93 \pm 0.15 b	0.17 \pm 0.04 b
	Intercrop	5.29 \pm 0.05 b	6.87 \pm 0.14 b	0.18 \pm 0.02 a	7.86 \pm 0.05 a	5.80 \pm 0.07 a	0.30 \pm 0.01 a
2019	Sole crop	5.98 \pm 0.10 a	7.12 \pm 0.09 a	0.24 \pm 0.01 a	6.17 \pm 0.11 b	5.12 \pm 0.10 b	0.13 \pm 0.03 b
	Intercrop	5.16 \pm 0.05 b	6.33 \pm 0.12 b	0.17 \pm 0.02 a	7.92 \pm 0.05 a	5.93 \pm 0.05 a	0.26 \pm 0.01 a

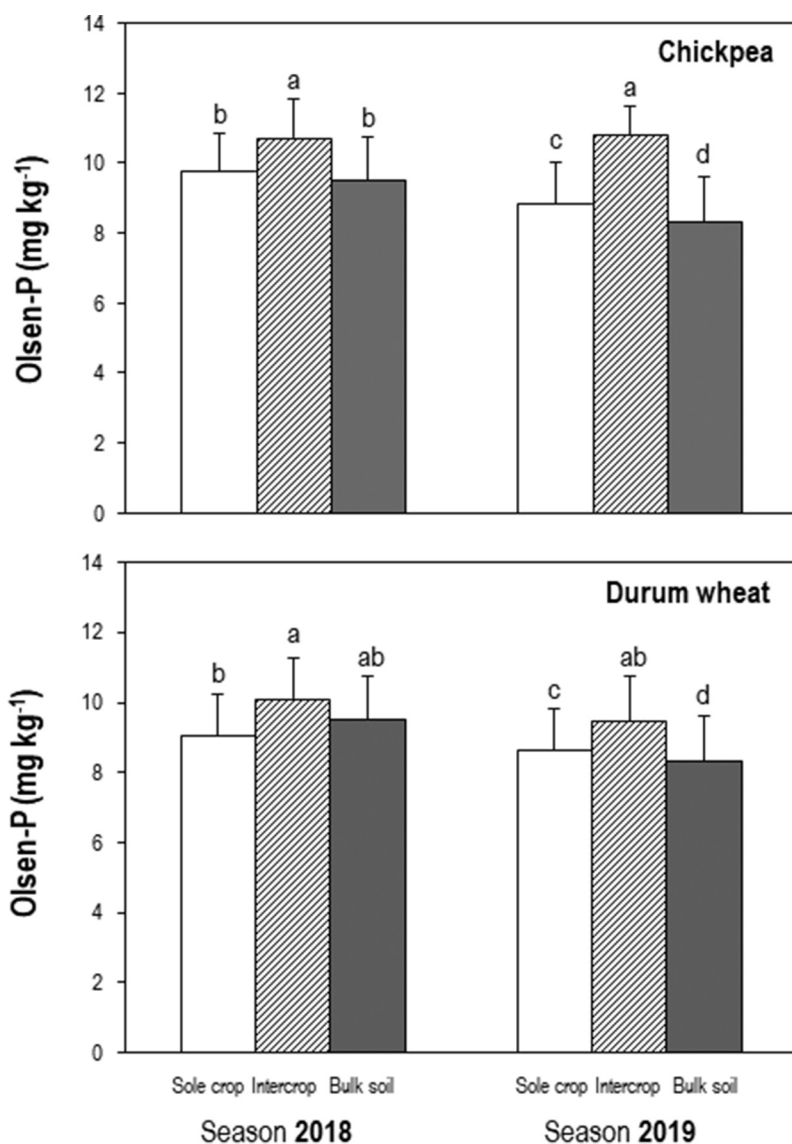


Figure 4. Olsen-P concentration in the rhizosphere of chickpea and durum wheat grown as sole crop and intercrop through two growing seasons 2018 and 2019. Values were compared to bulk soil corresponding to soil control without plant. Bulk soil was the same for both species within each growing season. Values represent the mean of six replicates \pm standard errors.

significantly higher for the intercrops than for the sole crops over two growing seasons (19.5 in 2018 and 21.3 in 2019). In contrast, durum wheat increased its P use efficiency when grown as sole cropped, while this increase was greater in 2019 (29%) compared to 2018 (15%). In the case of P absorption efficiency, this trait was significantly decreased in intercropped chickpea, while it increased by 39% and 50% in 2018 and 2019, respectively, for durum wheat when grown as intercropped.

Land equivalent ratio and competitive ratio

Land equivalent ratio (LER) for all parameters tested in this study (total DW, grain yield, and P uptake) was greater than 1, indicating an advantage of intercropping over sole cropping

Table 2. Phosphorus absorption and use efficiency for chickpea and durum wheat grown as sole crop and intercrop through two growing seasons in 2018 and 2019. Values represent the mean of six replicates \pm standard errors. The mean values labeled with the same letter were not significantly different at $p < .05$.

Growing season	Crop treatment	Chickpea		Durum wheat	
		P use efficiency (g total DW mg ⁻¹ P uptake)	P absorption efficiency (mg P uptake mg ⁻¹ p-Olsen)	P use efficiency (g total DW mg ⁻¹ P uptake)	P absorption efficiency (mg P uptake mg ⁻¹ p-Olsen)
		2018	Sole crop	15.26 \pm 0.22 b	0.027 \pm 0.001 a
	Intercrop	19.46 \pm 0.51 a	0.018 \pm 0.003 b	13.95 \pm 0.2 b	0.031 \pm 0.003 a
2019	Sole crop	16.74 \pm 0.30 b	0.025 \pm 0.002 a	17.60 \pm 0.3 a	0.014 \pm 0.001 b
	Intercrop	21.32 \pm 0.40 a	0.017 \pm 0.001 b	12.44 \pm 0.4 b	0.028 \pm 0.002 a

Table 3. Land equivalent ratio for total DW, grain yield, and P uptake by whole plants for chickpea and durum wheat grown as sole crop and intercrop through two growing seasons in 2018 and 2019. Values represent the mean of six replicates \pm standard errors. The mean values labeled with the same letter were not significantly different at $p < .05$.

Growing season	Land equivalent ratio (LER)		
	Total DW	Grain yield	P uptake
2018	2.38 \pm 0.06 a	1.98 \pm 0.143 a	2.48 \pm 0.04 b
2019	2.49 \pm 0.09 a	1.80 \pm 0.07 b	2.73 \pm 0.10 a
p-value	0.457	0.047	0.046

Table 4. Competitive ratio for total DW, grain yield, and P uptake by whole plants for chickpea and durum wheat grown as sole crop and intercrop through two growing seasons in 2018 and 2019. Values represent the mean of six replicates \pm standard errors. The mean values labeled with the same letter were not significantly different at $p < .05$.

Growing season	Chickpea			Durum wheat		
	Total DW	Grain yield	P uptake	Total DW	Grain yield	P uptake
2018	0.60 \pm 0.11 a	0.72 \pm 0.108 a	0.42 \pm 0.06 a	1.77 \pm 0.34 b	1.43 \pm 0.20 b	2.44 \pm 0.34 b
2019	0.51 \pm 0.05 a	0.55 \pm 0.06 b	0.34 \pm 0.03 a	1.99 \pm 0.24 a	1.84 \pm 0.23 a	2.99 \pm 0.378 a
p-value	0.340	0.039	0.126	0.029	0.039	0.013

(Table 3). The LER varied between growing seasons, it was the highest in 2018 (for grain yield) and 2019 (for P uptake).

Table 4 indicates all competitive ratios for total DW, grain yield, and P uptake of each species. During the two seasons, durum wheat was more competitive than chickpea for all parameters tested (total DW, grain yield, and P uptake) where their competitiveness was more pronounced for P uptake (CR = 2.44 in 2018 and CR = 2.99 in 2019).

Discussion

Most of the results reported in this field investigation are considered to be the first original findings on the agro-ecological assessment of chickpea-durum wheat intercropping system under low-P soil conditions, using calculated indices. The results of the present study agree with many studies reporting that intercropping legumes with cereals increase yields and improve the efficiency in use of environmental resources by stimulating plant growth and yield compared with their respective sole cropping systems. In the present study, the nodule biomass was significantly higher for chickpea when grown as intercropped with durum wheat (Figure 1), suggesting a higher soil resource use efficiency. Several studies have addressed the effect of intercropping on increasing nodule growth under P-deficiency (Brahimi et al. 2022; Latati et al. 2016). Banik et al. (2006) reported a similar effect of intercropping on N₂ fixation and nodule growth, who found that nodule biomass was higher for intercropping due to a beneficial association between cereal and legumes.

In this work, the observed significant increase in biomass of both shoots and roots (Figure 2) for the intercropped durum wheat under low-P soils is an evidence of positive interactions (facilitation, complementarity, etc.) with chickpea. In a recent growing literature, facilitation of cereals' growth by the intercropped legumes has been reported to be among the cereals' aboveground-driven factors leading to increased complementary resource use, which is one of the main physiological mechanisms behind this P use efficiency under P-deficiency (Lazali et al. 2021; Messaoudi et al. 2020). Such improvements that are presumably due to a higher ability of legumes to increase N₂-fixation may offer opportunities to maximize and sustain increased plant growth for intercropped species (Hauggaard-Nielsen et al. 2009). The data obtained in this study are also similar with previous results where P-deficiency can affect the growth of the associated legumes and subsequently their function of symbiotic nitrogen fixation (Kaci et al. 2018; Lazali et al. 2016). During 10 years of field experimentation in intercropping terms, Wang et al. (2014) found a significant increase in the ratio of faba bean total biomass intercropped with maize. These beneficial improvements are due to a greater capacity of legumes to increase these fixing activities and may offer opportunities to maximize and maintain the growth of intercalated plants (Jensen, Carlsson, and Hauggaard-Nielsen 2020). Legumes, which can adapt to different cropping patterns and can fix atmospheric nitrogen, may help sustain increased plant biomass and grain yield for the species with which they are intercropped (Messaoudi et al. 2020). This increased biomass results mainly from interspecific facilitation of nutrient use between the durum wheat and chickpea that was observed during the first growing season. Recent studies have confirmed the benefit of intercropping for cereal through facilitation mechanisms created by an intercropped legume, which was responsible for increasing inorganic P by rhizosphere acidification during N₂ fixation (Hinsinger et al. 2011).

In the present study, the increase in grain yield for the intercrops (Figure 3) may be a consequence of the observed increase in both the nutrient uptake and the plant biomass due to increased P availability in the rhizosphere. Indeed, the intercropping had a positive and significant effect on the total grain yield as attested by the higher LER over that found in sole cropping (Table 3). Likewise, grain yield of durum wheat was increased when intercropped with faba bean (Zhang and Li 2003). In this context, the estimation of land productivity by using the parameters of LER in intercropped crops (cereals-legume) indicates that the biomass and yield of cereals are probably better than those of sole cropped due to better use of growth resources (Chen et al. 2017; Latati et al. 2016). LER increases with decreasing levels of soil N, suggesting increased performance of legume-based intercropping systems in poor soils (Kermah et al. 2018). The high LER of intercropping suggests that this is not only a traditional mode of agriculture for the past but also a promising practice that could improve land productivity and decrease the environmental impacts of fertilizer N spills over the world in the future.

In this work, the intercropping appeared to positively influence nutrient uptake and use efficiency (Tables 1 and 2), especially for the intercropped durum wheat whose aboveground improvement was likely driven by the belowground legume performances. Enhanced P uptake was reported by different researchers under a varied intercropping system where legume was considered as a component, for example, pigeon pea-sorghum intercropping and lupine-wheat intercropping (Maitra et al. 2021). Additionally, low P levels in soils can evidently enhance the facilitation of intercropped durum wheat and chickpea due to enhanced P uptake and utilization (Li et al. 2007). The beneficial effects of legume-cereal intercropping on nutrient availability and uptake have been widely documented mainly in the case of P. Thus, in pigeon pea intercropping with maize, the physical root contact (rhizosphere) and their biochemical activities can have a positive and significant impact on soil structure as well as nutrient storage in these high P-sorbing soils (Garland et al. 2017). Consequently, the proportion of macro- and micro-aggregates increased by 52% and 111%, respectively, in the intercropping treatment compared to sole maize. Therefore, there was a significant increase in organic P storage in intercrop micro-aggregates compared to sole maize (84 vs. 29 mg P kg⁻¹, respectively) (Garland et al. 2017). Biologically fixed nitrogen increased from 89% in the sole pigeon pea to 96% in the intercropping system (Garland et al. 2017). Additionally, cowpea-maize intercropping improved soil P availability and maize yields in alkaline soils (Latati et al. 2016). Under P-deficient conditions

in an intercropping system like soybean and wheat, this crop combination stimulates root microbial diversity, root biomass allocation, and P-hydrolyzing acid phosphatase activity in roots. Consequently, increased microbial diversity and root-induced morphological and biochemical changes contribute to improving P and N acquisition (Bargaz et al. 2017). According to Brahim et al. (2022), the increased P availability in the rhizosphere was higher when the two species were intercropped compared to monoculture. Such an increase could be a consequence of root-induced alkalization as well as other root-induced processes, e.g., exudation of phosphatases and carboxylates. Meanwhile, in the rhizospheric soil of barley intercropped with faba beans, an increase in available P content was confirmed and coincided with an increase in acid phosphatase activity (Mouradi et al. 2018).

The increase in P availability in the rhizosphere of intercropped durum wheat (Figure 4) can be explained by acidification of the chickpea rhizosphere (Lazali and Bargaz 2017). In low-P soils, rhizosphere acidification could contribute to the increase in P availability for legumes such as common beans (Lazali and Drevon 2021). The acidification of the chickpea rhizosphere may be related to a higher uptake of cations than anions (Lazali and Bargaz 2017). Also, root interactions have a profound impact on P uptake and yield in the durum wheat-chickpea system, with rhizosphere acidification caused by chickpea increasing mobilization of organic/inorganic P sources and facilitating P uptake by target wheat (Messaoudi et al. 2020). In soils, microorganisms hold an important role in the mobilization of poorly available P and subsequent increase in the amount of P available for plant acquisition, either via the solubilization of inorganic P pools or the enzymatic hydrolysis of organic P pools (Tang et al. 2014). The benefits of cereal-legume intercrops for P uptake depend on species combination (He et al. 2013) and soil-P availability (Namatsheve et al. 2020).

Conclusion

This study demonstrated that intercropping legumes and cereals in low P soils enhanced P availability. The results showed an increase in P use efficiency and improved plant growth, validating the assumption that intercropping enhances phosphorus availability and subsequently promotes agricultural productivity. Then, the findings indicated that nutrients complementary utilization between legumes and cereals in the intercropping system indeed minimized resource competition. This was evident through the observed positive effects on crop yield, so supported the assumption that intercropping can mitigate resource competition and improve crop yield compared to sole cropping. The positive effects of phosphorus availability, nutrient use efficiency, and yield enhancement indicate the potential of intercropping as an agro-ecologically intensified practice which offers superior soil fertility and enhanced crop performance compared to sole cropping practices. This study provides valuable insights for designing intercropping systems that are optimized, productive, P, and water resources efficiency, supporting sustainable agricultural practices

Acknowledgements

This work was supported by the CROSYMED Project, funded through the ARIMNet2 2017 Joint Call by the funding agency FNRS/DT/DGRSDT, Algeria. ARIMNet2 (ERA-NET) has received funding from the European Union's Seventh Framework Programme for research, technological development, and demonstration under grant agreement no. 618127. This work was also funded by the PRFU project (D04N01UN440120180001) run by the Algerian Ministry of Higher Education and Scientific Research.

Disclosure statement

No potential conflict of interest was reported by the author(s).

References

- Banik, P., A. Midya, B. K. Sarkar, and S. S. Ghose. 2006. Wheat and chickpea intercropping systems in an additive series experiment: Advantages and weed smothering. *European Journal of Agronomy* 24 (4):325–32. doi:10.1016/j.eja.2005.10.010
- Bargaz, A., G. L. Noyce, R. Fulthorpe, G. Carlsson, J. R. Furze, E. S. Jensen, D. Dhiba, and M. E. Isaac. 2017. Species interactions enhance root allocation, microbial diversity and P acquisition in intercropped wheat and soybean under P deficiency. *Applied Soil Ecology* 120:179–88. doi:10.1016/j.apsoil.2017.08.011.
- Brahimi, S., O. Toumatia, J. J. Drevon, A. Zitouni, and M. Lazali. 2022. Intercropping legumes and cereals increases resource use efficiency and crop productivity in low phosphorus soils under semi-arid Mediterranean conditions. *Agroecology and Sustainable Food Systems* 46 (10):1482–1501. doi:10.1080/21683565.2022.2121951.
- Chamkhi, I., T. Benali, T. Aanniz, N. El Menyiy, F. E. Guaougaou, N. El Omari, M. El-Shazly, G. Zengin, and A. Bouyahya. 2021. Plant-microbial interaction: The mechanism and the application of microbial elicitor induced secondary metabolites biosynthesis in medicinal plants. *Plant Physiology & Biochemistry* 167:269–95. doi:10.1016/j.plaphy.2021.08.001.
- Chen, P., Q. Du, X. Liu, L. Zhou, S. Hussain, L. Lei, C. Song, X. Wang, W. Liu, F. Yang, et al. 2017. Effects of reduced nitrogen inputs on crop yield and nitrogen use efficiency in a long term maize-soybean relay strip intercropping system. *Public Library of Science ONE* 12 (9):e0184503. doi:10.1371/journal.pone.0184503.
- Dawson, C. J., and J. Hilton. 2011. Fertiliser availability in a resource-limited world: Production and recycling of nitrogen and phosphorus. *Food Policy* 36:14–22. doi:10.1016/j.foodpol.2010.11.012.
- Garland, G., E. K. Bünemann, A. Oberson, E. Frossard, and J. Six. 2017. Plant-mediated rhizospheric interactions in maize-pigeon pea intercropping enhance soil aggregation and organic phosphorus storage. *Plant and Soil* 415 (1–2):37–55. doi:10.1007/s11104-016-3145-1.
- Haugaard-Nielsen, H., M. Gooding, P. Ambus, G. Corre-Hellou, Y. Crozat, C. Dahlmann, A. Dibet, P. Fragstein, A. Pristeri, M. Monti, et al. 2009. Pea–barley intercropping for efficient symbiotic N₂-fixation, soil N acquisition and use of other nutrients in European organic cropping systems. *Field Crops Research* 113:64–71.
- He, Y., N. Ding, J. C. Shi, M. Wu, H. Liao, and J. M. Xu. 2013. Profiling of microbial PLFAs: Implications for interspecific interactions due to intercropping which increase phosphorus uptake in phosphorus limited acidic soils. *Soil Biology and Biochemistry* 57:625–34. doi:10.1016/j.soilbio.2012.07.027.
- Hinsinger, P., E. Betencourt, L. Bernard, A. Brauman, C. Plassard, J. Shen, and F. Zhang. 2011. P for two, sharing a scarce resource: Soil phosphorus acquisition in the rhizosphere of intercropped species. *Plant Physiology* 156 (3):1078–86. doi:10.1104/pp.111.175331.
- Hinsinger, P., C. Plassard, C. X. Tang, and B. Jaillard. 2003. Origins of root-mediated pH changes in the rhizosphere and their responses to environmental constraints: A review. *Plant and Soil* 248:43–59.
- Huang, C. D., Q. Q. Liu, X. L. Li, and C. C. Zhang. 2019. Effect of intercropping on maize grain yield and yield components. *Journal of Integrative Agriculture* 18 (8):1690–700. doi:10.1016/S2095-3119(19)62648-1.
- Jensen, E. S., G. Carlsson, and H. Haugaard-Nielsen. 2020. Intercropping of grain legumes and cereals improves the use of soil N resources and reduces the requirement for synthetic fertilizer N: A global-scale analysis. *Agronomy for Sustainable Development* 40 (1):5. doi:10.1007/s13593-020-0607-x.
- Jones, D. L., and P. Hinsinger. 2008. The rhizosphere: Complex by design. *Plant and Soil* 312 (1–2):1–6. doi:10.1007/s11104-008-9774-2.
- Kaci, G., D. Blavet, S. Benlahrech, E. Kouakoua, P. Couderc, P. Deleporte, D. Desclaux, M. Latati, M. Pansu, J. J. Drevon, et al. 2018. The effect of intercropping on the efficiency of faba bean-rhizobia symbiosis and durum wheat soil-nitrogen acquisition in a Mediterranean agroecosystem. *Soil and Environment* 64 (3):138–46. doi:10.17221/9/2018-PSE.
- Kermah, M., A. C. Franke, S. Adjei-Nsiah, B. D. K. Ahiabor, R. C. Abaidoo, and K. E. Giller. 2018. N₂-fixation and N contribution by grain legumes under different soil fertility status and cropping systems in the Guinea savanna of northern Ghana. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 261:201–10. doi:10.1016/j.agee.2017.08.028.
- Lambers, H. 2022. Phosphorus acquisition and utilization in plants. *Annual Review of Plant Biology* 73 (1):17–42. doi:10.1146/annurev-arplant-102720-125738.
- Latati, M., A. Bargaz, B. Belarbi, M. Lazali, S. Benlahrech, S. Tellah, G. Kaci, J. J. Drevon, and S. M. Ounane. 2016. The intercropping common bean with maize improves the rhizobial efficiency, resource use and grain yield under low phosphorus availability. *The European Journal of Agronomy* 72:80–90. doi:10.1016/j.eja.2015.09.015.
- Lazali, M., and A. Bargaz. 2017. Examples of belowground mechanisms enabling legumes to mitigate phosphorus deficiency. In *Legume nitrogen fixation in soils with low phosphorus availability*, ed. S. Sulieman and L. S. P. Tran, 135–52. Switzerland: Springer International Publishing.
- Lazali, M., D. Blavet, C. Pernot, D. Desclaux, and J. J. Drevon. 2017. Efficiency of phosphorus use for dinitrogen fixation varies between common bean genotypes under phosphorus limitation. *Agronomy Journal* 109 (1):283–90. doi:10.2134/agronj2016.01.0034.
- Lazali, M., S. Boudsocq, E. Taschen, M. Farissi, W. Hamdi, P. Ralli, and H. Sentenac. 2021. CROSYMED project: Enhancing nutrient use efficiency through legumes in agro-ecosystems of the Mediterranean basin. *Sustainability* 13 (9):4695. doi:10.3390/su13094695.
- Lazali, M., S. Brahimi, and J. J. Drevon. 2018. High yields in a low-P tolerant recombinant inbred line of common bean under field conditions. *Rhizosphere* 8:27–33. doi:10.1016/j.rhisph.2018.09.001.

- Lazali, M., S. Brahimi, C. Merabet, M. Latati, C. Benadis, R. Maougal, D. Blavet, J. J. Drevon, and S. M. Ounane. 2016. Nodular diagnostic of contrasting recombinant inbred lines of *Phaseolus vulgaris* in multi-local field tests under Mediterranean climate. *European Journal of Soil Biology* 73:100–07. doi:10.1016/j.ejsobi.2016.02.002.
- Lazali, M., and J. J. Drevon. 2021. Mechanisms and adaptation strategies of tolerance to phosphorus deficiency in the rhizobial symbiosis with legumes. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 52 (13):1469–83. doi:10.1080/00103624.2021.1885693.
- Li, L., S. M. Li, J. H. Sun, L. L. Zhou, X. G. Bao, H. G. Zhang, and F. S. Zhang. 2007. Diversity enhances agricultural productivity via rhizosphere phosphorus facilitation on phosphorus-deficient soils. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 104:11192–96.
- Li, S. M., L. Li, F. S. Zhang, and C. Tang. 2004. Acid phosphatase role in chickpea/maize intercropping. *Annals of Botany* 94:297–303.
- Lithourgidis, A. S., D. N. Vlachostergios, C. A. Dordas, and C. A. Damalas. 2011. Dry matter yield, nitrogen content, and competition in pea–cereal intercropping systems. *The European Journal of Agronomy* 34 (4):287–94. doi:10.1016/j.eja.2011.02.007.
- Li, L., D. Tilman, H. Lambers, and F. S. Zhang. 2014. Plant diversity and overyielding: Insights from belowground facilitation of intercropping in agriculture. *New Phytologist* 203 (1):63–69. doi:10.1111/nph.12778.
- Liu, X., T. Rahman, F. Yang, C. Song, T. Yong, J. Liu, C. Zhang, W. Yang, and H.-M. Lam. 2017. PAR interception and utilization in different maize and soybean intercropping patterns. *Public Library of Science ONE* 12 (1):e0169218. doi:10.1371/journal.pone.0169218.
- Madembo, C., B. Mhlanga, and C. Thierfelder. 2020. Productivity or stability? Exploring maize-legume intercropping strategies for smallholder Conservation Agriculture farmers in Zimbabwe. *Agricultural Systems* 185:102921. doi:10.1016/j.agsy.2020.102921.
- Maitra, S., A. Hossain, M. Brestic, M. Skalicky, P. Ondrisik, H. Gitari, K. Brahmachari, T. Shankar, P. Bhadra, J. B. Palai, et al. 2021. Intercropping—A low input agricultural strategy for food and environmental security. *Agronomy* 11 (2):343. doi:10.3390/agronomy11020343.
- Messaoudi, H., F. Gérard, P. Dokukin, H. Djamai, N. Y. Rebouh, and M. Latati. 2020. Effects of intercropping on field-scale phosphorus acquisition processes in a calcareous soil. *Plant and Soil* 449 (1–2):331–41. doi:10.1007/s11104-020-04491-7.
- Mouradi, M., M. Farissi, B. Makoudi, A. Bouizgaren, and C. Ghoulam. 2018. Effect of faba bean (*Vicia faba* L.)–rhizobia symbiosis on barley's growth, phosphorus uptake and acid phosphatase activity in the intercropping system. *Annals of Agrarian Science* 16 (3):297–303. doi:10.1016/j.aasci.2018.05.003.
- Namatshewe, T., R. Cardinael, M. Corbeels, and R. Chikowo. 2020. Productivity and biological N₂-fixation in cereal-cowpea intercropping systems in sub-saharan Africa. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 40 (4):30. doi:10.1007/s13593-020-00629-0.
- Olsen, S. R., C. V. Cole, F. S. Watanabe, and L. A. Dean. 1954. *Estimation of available phosphorus in soil by extraction with sodium bicarbonate*. Washington, USA: Circular. 939 USDA.
- Pathan, S. I., M. T. Ceccherini, F. Sunseri, and A. Lupini. 2020. Rhizosphere as hotspot for plant-soil-microbe interaction. In *Carbon and nitrogen cycling in soil*, ed. R. Datta, R. S. Meena, S. I. Pathan, and M. T. Ceccherini, 17–43. Singapore: Springer.
- Pearse, S. J., E. J. Veneklaas, G. R. Cawthray, M. D. A. Bolland, and H. Lambers. 2006. Carboxylate release of wheat, canola and 11 grain legume species as affected by phosphorus status. *Plant and Soil* 288 (1–2):127–39. doi:10.1007/s11104-006-9099-y.
- Tang, X., L. Bernard, A. Brauman, T. Daufresne, P. Deleporte, D. Desclaux, G. Souche, S. A. Placella, and P. Hinsinger. 2014. Increase in microbial biomass and phosphorus availability in the rhizosphere of intercropped cereal and legumes under field conditions. *Soil Biology and Biochemistry* 75:86–93. doi:10.1016/j.soilbio.2014.04.001.
- Valizadeh, G. R., Z. Rengel, and A. W. Rate. 2003. Response of wheat genotypes efficient in P utilization and genotypes responsive to P fertilization to different P banding depths and watering regimes. *Australian Journal of Agricultural Research* 54 (1):59–65. doi:10.1071/AR02040.
- Wang, Z., X. Bao, X. Li, X. Jin, J. Zhao, J. Sun, P. Christie, and L. Li. 2014. Intercropping maintains soil fertility in terms of chemical properties and enzyme activities on a timescale of one decade. *Plant and Soil* 391 (1–2):265–82. doi:10.1007/s11104-015-2428-2.
- Xue, Y., H. Xia, P. Christie, Z. Zhang, L. Li, and C. Tang. 2016. Crop acquisition of phosphorus, iron and zinc from soil in cereal/legume intercropping systems: A critical review. *Annals of Botany* 117 (3):363–77. doi:10.1093/aob/mcv182.
- Zhang, F. S., and L. Li. 2003. Using competitive and facilitative interactions in intercropping systems enhances crop productivity and nutrient-use efficiency. *Plant and Soil* 248 (1/2):305–12. doi:10.1023/A:1022352229863.
- Zhang, D., Z. Sun, L. Feng, W. Bai, N. Yang, Z. Zhang, G. Du, C. Feng, Q. Cai, Q. Wang, et al. 2020. Maize plant density affects yield, growth and source-sink relationship of crops in maize/peanut intercropping. *Field Crops Research* 257:107926. doi:10.1016/j.fcr.2020.107926.