

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



Université 20 Aout 1955 Skikda

Faculté des sciences

Département de sciences Agronomiques



Filière : Sciences Agronomique

Option : Amélioration des plantes

Mémoire de fin d'études :

En vue de l'obtention du diplôme de Master II en **Amélioration des plantes**

Thème :

Analyse et évaluation des performances agro-physiologiques de la culture de la féverole en termes de fixation symbiotique de l'azote W.skikda

Présenté le :29/06/2024

-
- SEHAB OUSSAMA
 - LAIB DJASSEM

Membre de Jury:

Dr. SOUILAH NABILA	(MCB)	Présidente	Université du 20 Août 1955 – Skikda
Dr. MESSAOUD LAIB	(MAA)	Examineur	Université du 20 Août 1955 – Skikda
DR.FOUFOU AMAR	(MAA)	Examineur	Université du 20 Août 1955 – Skikda
Pr. LATATI MOURAD	(MCA)	Promoteur	Université du 20 Août 1955 – Skikda
Dr. MESSAOUDI AMINA	(MCA)	CO-PROMOTEUR	Université du 20 Août 1955 – Skikda

Année universitaire : 2023-2024

| Remerciement :|

Nous tenons à remercier d'abord le bon DIEU qui nous a muni d'une volonté suffisante pour accomplir ce travail.

Nous tenons également à remercier sincèrement notre Encadreur Mr. LATATI qui nous a proposé ce sujet, orienté, soutenu et conseillé au long de sa réalisation.

Nos parents qui nous ont tant donné pour faire de nous ce que nous sommes aujourd'hui.

Nous profitons de l'occasion pour exprimer nos vifs remerciements à tous les enseignants du département de l'agronomie qui ont contribué à notre formation, durant nos études.

Enfin, nos sincères remerciements vont aux membres du jury pour le temps consacré à la lecture de ce document.

Dédicace~

Je dédie ce travail à mes parents
Surtout ma mère, source de tendresse et
d'amour
pour son Soutien
dans toute ma carrière scolaire
et je souhaite que dieu les protèges
Que dieu protège
toute ma famille mes oncles
mes cousins , mes collègues,
et mes amis

SEHAB OUSSAMA

Décidas

C'est avec l'aide et la grâce du Dieu qu'on a achevé ce modeste travail,

A l'âme de mon père et mon beau père qui nous ont quitter

A celle qui ma arrose de tendresse et d'espoir ;a la source d'Amour ; à ma mère

A ma famille

encouragements permanents, leurs soutiens moral, et leurs sources de bonheur

Merci d'être toujours là pour moi.

Laib djassem

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Valeur nutritionnelle de quelques légumineuses en g pour 100g de MS

.....7

Tableau II : Evaluation de la superficie et production de la fève et féverole en Algérie (FAOSTAT., 2015)..... 22

Liste des figures

Figure 1. Différents types d'associations avec des légumineuses (Philippe Monchaux, communication personnelle).....	9
Figure 2. Evolution des superficies, productions et rendements de légumineuses alimentaires durant la période allant de 2005 à 2016 (Statistiques MADRP-DSASI)	12
Figure 3. Photo de partie de plante de la fève (<i>vicia faba L.</i>).....	18
Figure 4. Les différentes tailles de la graine de fève (<i>vicia faba L.</i>)	18
Figure 5. Photo de nodosités sur des racines de féverole.....	27
Figure 6. Cercle vertueux de fertilité du sol par couplage des cycles biogéochimiques de N et P via la fixation d'azote.	28
Figure 7. Différence de fixation symbiotique en culture pure et en association (d'après Justes et al., 2014).	29
Figure 8. La symbiose : des échanges réciproques de nutriments entre la plante et le rhizobium hébergé et transformé en bactéroïde dans le nodule.	30
Figure 9. Cycle de Fixation d'Azote	32
Figure10. Schémas du cycle du P dans le système sol/engrais/plante (Frossard et al., 2004)	34
Figure 11. Comparaison entre une féverole récoltée en grains et un trèfle.....	35
Figure 12. Schéma des réponses morphologiques, physiologiques et biochimiques à la déficience en phosphate (Pi) chez les plantes (Martins et al., 2017).	37
Figure 13: Mécanisme de solubilisation du phosphore dans la rhizosphère de la féverole.....	43

Sommaire :

Résumé.....	1
Introduction générale.....	2
Chapitre I: La culture de légumineuses.....	5
I.1. Généralité.....	6
I.2. Intérêts agronomiques des légumineuses.....	8
I.3. Intérêts nutritionnels.....	8
I.4. Intérêt zootechnique.....	8
I.5.2. Cultures possibles en association.....	9
I.5. Intégration dans les systèmes de cultures.....	9
I.5.1. Rotation des cultures avec des légumineuses.....	9
I.8. La consommation mondiale des légumineuses.....	10
I.7. La production des légumineuses dans le monde.....	10
I.6. les avantages de l'introduction de légumineuses	10
I.9. Situation des légumineuses en Algérie	11
I.1.9.1. Production des légumineuses en Algérie.....	11
I.1.9.2. <i>La diminution de la production des légumineuses en Algérie.....</i>	12
Chapitre II: La culture de la féverole.....	14
II.1. Généralité.....	15
II.2. Origine et évolution.....	15
II.3. Classification botanique de la féverole	16
II.4. Caractéristiques de la plante	17
II.5. Adaptation	18
II.6. Utilisations	19
II.6.2. <i>Alimentation animale et culture fourragère</i>	20
II.6.3. <i>Culture de couverture</i>	20
II.7. Importance de la production de la féverole à travers le monde.....	21
II.8. Importance de la culture de la féverole en Algérie.....	21
II.9. Zone de production en Algérie.....	22

II.10. Intérêt agronomique de la culture.....	23
II.11. Place dans la rotation.....	24
II.12. les ennemis de la féverole.....	24
Chapitre III: Fixation symbiotique de l'azote et déficience en phosphore.....	25
III.1. Fixation symbiotique de l'Azote chez les légumineuses.....	26
III.1.1. Effet de la composition chimique du sol sur la fixation symbiotique	26
III.1.2. Nodosité	27
III.3. Les associations avec les légumineuses	28
III.4. L'Azote et le phosphore.....	31
III.4.1. L'Azote (N).....	31
III.4.2. Le phosphore.....	32
III.5. Les quantités d'azote fixées par une légumineuse dépendent des espèces..	34
III.6. Effet de la déficience en phosphore Pi sur la fixation symbiotique de l'azote N₂ des légumineuses.....	35
III.7. Mécanismes ou stratégies d'adaptations des légumineuses sous déficience en phosphore.....	36
III.7.1 Les processus biochimiques	38
III.7.2 Les processus physiologiques.....	39
III.7.3. Mécanismes de structure	40
III.8. Déficience en phosphore chez la féverole	40
III.9. Influence de la carence en phosphore sur les nodosités	42
Conclusion générale.....	44
Références bibliographiques.....	46

Résumé: La déficience en phosphore est considérée comme l'un des premiers facteurs qui caractérise les sols carbonatés et alcalins en Algérie. Cependant, le phosphore est un élément essentiel pour le développement des céréales et de légumineuses dont il est indispensable de la fixation symbiotique de l'azote. L'objectif de ce travail de mémoire est le développement d'une recherche bibliographique sur les mécanismes et les caractéristiques de fixation symbiotique de N₂ par la culture de féverole ainsi l'adaptation de ce dernier sur la déficience du phosphore dans le sol, plus particulièrement dans le cas d'une stratégie d'intensification des systèmes de cultures céréalières en Algérie par l'introduction de la féverole sous des pratiques de rotation et association avec les céréales. Notre synthèse bibliographique a révélé une possible importance agronomique de la culture de féverole dans la résorption de la pratique de jachère en Algérie à travers son introduction en systèmes de rotation et d'association avec des cultures céréalière à savoir l'orge, l'avoine et le blé dur, plus particulièrement en zone sub-humides (e.g. W. SKIKDA) en Algérie. De plus, la fixation symbiotique de N₂ joue un rôle primordiale et avantageux dans le contrôle des mécanismes de solubilisation du phosphore dans le sol à travers l'acidification de la rhizosphère. Cet avantage est plus particulièrement prononcé dans le cas de la compétition interspécifique entre la féverole et les espèces céréalière en association grace aux mécanismes de facilitation et de complémentarité dans de l'acquisition du phosphore. Ce travail nous a permet de conclure que le choix d'une gamme variétale de la féverole potentielle en terme de fixation symbiotique de N₂ pourra contribuer à renforcer l'intensification agro-écologique des systèmes de cultures céréalières en Algérie.

Mots clés: Déficience; Intensification; Jachère; Légumineuse; Compétition; Rhizosphère.

Résumé en arabe

يعتبر نقص الفوسفور احد العوامل الأساسية التي تميز التربة الغازية و القلوية في الجزائر لكن الفوسفور عنصر أساسي لتطوير الحبوب و البقوليات الذي هو ضروري لتثبيت الازوت التكافلي

الهدف من هذا العمل في المذكرة هو تطوير بحث بيبيولوجرافي حول آليات و خصائص التثبيت بواسطة نبات الفول و بالتالي تكيف هذا الأخير حول نقص الفوسفور في التربة N₂ التكافلي لل أيضا خصوصا في حالة إستراتيجية تكثيف أنظمة زراعة الحبوب في الجزائر من خلال تقديم الفول في ظل ممارسات التناوب والارتباط بالحبوب

التوليف البيبيولوجرافي الخاص بنا يكشف عن أهمية زراعية محتملة في زراعة الفول في إعادة استيعاب الممارسة للبور في الجزائر عبر تقديم نظام الدوران مع الحبوب مثل الشعير و في الجزائر (eg w.skikda) الشوفان و القمح القاسي وبشكل خاص في المناطق شبه الرطبة بالإضافة على ذلك تثبيت الازوت التكافلي يلعب دور ضروري و مفيد في التحكم في آليات ذوبان الفوسفور في التربة من خلال تحمض منطقة الجذور

هذه الميزة خصوصا في حالة المنافسة بين الأنواع من الفول و أنواع الحبوب أيضا بالتعاون بفضل آليات التيسير والتكامل في الحصول على الفوسفور . سمح لنا هذا العمل باستنتاج أن اختيار

يمكن ان تساهم في تعزيز N₂ مجموعة متنوعة من نبات الفول من حيث التثبيت التكافلي لل التكثيف الزراعي الإيكولوجي لأنظمة زراعة الحبوب في الجزائر

Résumé en anglais

Phosphorus deficiency is considered to be a primary factor that characterizes carbonate and Alkaline soils in Algeria .

However , phosphorus is an essential element for the development of cereals and legumes for which it is essential for the symbiotic fixation of nitrogen

The objective of this thesis work is the development of a bibliographic research on the mechanisms and characteristics of symbiotic fixation of N₂ by the cultivation of faba bean as well as the adaptation of the latter on the deficiency of phosphorus in the soil more particularly in the case of a strategy of intensification of cereal cultivation systems in Algeria by the introduction of faba bean under rotation practices and association with cereals .

Our bibliographic synthesis reveals a possible agronomic importance of faba bean cultivation in the reduction of the pratique of fallowing in Algeria through its introduction, particularly in sub-humid zones (e.g.w.skikda) in Algeria.

In addition ,the symbiotic fixation of N₂ plays a primordial and advantageous role in the Control of phosphorus solubilization mechanisms in the soil through the acidification of the rhizosphere .

This Advantage is more particularly pronounced in the Case of interspecific competition between faba bean and cereal species in association thanks to the mechanisms.

Of facilitation and complementarity of de acquisition of phosphorus.

This work allowed us to conclue that the choice of a potential range of faba bean varieties in terms of symbiotic fixation of N₂ could contribute to strengthening the agroecological intensification of cropping systems cereal growers in Algeria .

Introduction générale

Le système de production jachère-céréales est le système le plus pratiqué en Algérie pour la production alimentaire, c'est un système extensif qui ne fournit que la moitié des besoins en céréales de la population Algérienne (Latati et al., 2014, 2016). En Algérie, les zones de production agricole sont localisées dans les zones arides et semi-arides où le climat est considéré comme un facteur limitant du développement des grandes cultures en générales et plus particulièrement les céréales et les légumineuses (Tellah et al., 2016).

De plus en ces zones, la majeure des sols sont déficients en phosphore (P) à cause des taux élevés du calcaire dans le sol (Alkama et al., 2010, Latati et al., 2017). Les agriculteurs sont également confrontés à une faible productivité des systèmes de cultures, liée à une pratique de rotation céréales-jachère associée à l'élevage qui est peu productive et moins durable (Belaid, 2016).

L'introduction de légumineuses au niveau des systèmes de cultures céréalières en zone sub-humides et semi-aride de l'Algérie est suggérée comme une solution alternative de la pratique de rotation céréales-jachère en Algérie qui représente plus de 40% de la surface agricole utile (Latati et al., 2020). Cette dernière stratégie est considérée comme un outil puissant pour améliorer la productivité, la résilience et la durabilité des systèmes céréalières en améliorant de manière générale la fertilité des sols et en particulier la biodisponibilité du phosphore dans les sols déficients en P (Lazali et al., 2016; Latati et al., 2019); tout en réduisant l'utilisation des intrants chimiques via la fertilisation phosphatée, et dans une certaine mesure le renforcement de la résilience des agroécosystèmes céréalières en Algérie sous pratique de rotation, association et cover crop entre les légumineuses et les céréales (Kherif et al., 2021; 2022).

Cependant, les cultures légumineuses font face à plusieurs contraintes d'ordre biotique et abiotique, surtout les stress hydriques dus à des gelées, les températures extrêmes et les stress dus aux déficiences des nutriments en particulier le P qui est considéré comme un facteur limitant de leur nodulation (Alkama et al., 2009; Martins et al., 2017).

Les légumineuses sont globalement confrontées à la disponibilité limitée du P dans le sol. c'est le cas des sols Algériens situés au Nord soit en zone sub-humide ou semiarid dont le pH se varié entre 7.5 et 8.5 (Alkama *et al.*, 2009; Latati *et al.*, 2013), et sont pour la majorité (70 à 80% en zone semi-aride) riche en calcaire avec un taux de calcaire (Djili *et al.*, 1999), Ces par conséquence sont carencés en P et ont une efficacité faible en ce qui concerne l'utilisation du P ajouté dans le sol à travers l'utilisation des engrais phosphatés (Hinsinger 2001), En effet, la grande partie du P appliquée sera convertie en formes non-disponibles (i.e. non phytoassimilable) et ne sera pas facilement utilisée par la plante (Valantin-Morison *et al.*, 2014)

L'amélioration de la biodisponibilité du P dans ces zones de production marginale est donc considérée comme une stratégie primordiale pour le renforcement de la production des légumineuses et des céréales afin de permettre la résorption de la pratique de jachère en Algérie/ En effet, l'intensification agro-écologique des agrosystèmes céréaliers est considérée comme une option prometteuse pour booster la durabilité et la résilience de ces systèmes de cultures (Messaoudi *et al.*, 2021). Plusieurs auteurs Algériens ont rapporté des solutions alternatives pour concrétiser la mise en place de cette intensification agro-écologique à savoir; la diversification des systèmes de cultures céréaliers à travers l'introduction des légumineuse en rotation, association et cover crop avec les céréales (Kherif *et al.*, 2023). De ce fait, l'amélioration et la sélection variétale des espèces légumineuses à forte potentielle de fixation symbiotique de l'azote et forte solubilisation du phosphore dans la rhizosphère est une stratégie prometteuses pour la réussite de cette stratégie d'intensification agroécologique (Houassine, 2019). Plusieurs études suggèrent les associations céréales - légumineuses comme une pratique efficace pour booster la production de légumineuses avec les céréales tout en améliorant l'assimilation du P et la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique N₂ (FSN) dans les sols à faible teneur en P et N (Betencourt *et al.* 2012, Martins *et al.*, 2017).

Le féverole (*Vicia faba*) est considéré comme une espèce légumineuse très cultivée en Algérie pour une double utilisation à savoir comme produit fourrager ou alimentaire (Houassine, 2019). Dans le monde, le féverole est cultivé en monoculture ou plus particulièrement en association en raison du potentiel de son rendement supérieur (Li *et al.*, 2003). Le système d'association féverole - céréales est largement

utilisé dans de nombreux pays, des études récentes sur ces associations rapportent une augmentation de 20% de la production dans une association avec maïs sans apports supplémentaires de fertilisant phosphaté et plus de 38% avec un apport d'engrais phosphaté (Li *et al.* 2010).

La culture de féverole dont le potentiel de rendement est rapporté pour certaines zones peut être introduite en remplacement de la vesce en tant que fourrage en grains dans les zones potentielles. En effet, la féverole peut très bien choisis comme espèce prometteuse dans le programme d'introduction des espèces légumineuses dans les systèmes de production céréalière plus particulièrement sous une pratique de rotation et/ou association avec l'orge, le blé dur et l'avoine dans les zones favorables sous climat sub-humide en Algérie (Houassine *et al.*, 2019 ; Messaoudi *et al.*, 2021). Ces derniers auteurs ont également confirmés que le principe de facilitation et de complémentarité d'utilisation des ressources nutritives dans le système d'association féverole- céréales est fortement prononcé et qui fait intervenir divers mécanismes rhizosphériques aboutissant à l'amélioration de la disponibilité du P dans le sol. Ce dernier est favorisée par l'activité de fixation symbiotique de l'azote atmosphérique N₂ par la féverole et qui est considéré comme l'un des mécanismes susceptibles d'améliorer l'acquisition de N et P dans l'association féverole- céréales dans les sols neutres à alcalins (Latati *et al.*, 2016; Houassine, 2009). De plus, la culture mécanisée de féveroles est considérée comme une culture qui résiste davantage à l'engrenage, fait une meilleure adaptation aux sols pierreux et calcaires (Hamadache, 2014, Maatougui. 1995).

L'objectif principal de ce travail de master est le développement d'une recherche bibliographique sur la culture des légumineuses et celle de la féverole en relation avec la fixation symbiotique de l'azote ainsi les mécanismes d'adaptation de ces derniers sur la déficience en phosphore. Le présent mémoire est répartie en trois chapitre à savoir; (i) le premier chapitre qui porte sur des généralités sur la famille ainsi la culture des légumineuses; (ii) un deuxième chapitre qui est consacré pour décrire la partie botanique, les caractéristique agromorphologique et agronomique de la culture du féverole; (iii) et un troisième chapitre dont lequel nous avons décrit le processus de fixation symbiotique de l'azote et sa relation avec la déficience du phosphore dans le sol.

Chapitre I: La culture de légumineuses

I.1. Généralité

Les légumineuses sont des plantes dicotylédones appartenant à la famille des Fabacées, qui représentent la troisième famille de plantes par le nombre d'espèces après les Asteraceae et les Orchidaceae (**Schneider et al., 2015**). De plus, les légumineuses sont la deuxième grande famille de cultures au monde, après les céréales, et couvrent environ 14 % des terres agricoles (**Aranjuelo et al., 2014**).

Les légumineuses représentent une source de protéine de qualité pour l'alimentation humaine (haricot, lentille, pois, pois chiche, fève) ou pour l'alimentation animale sous forme de graines (pois, féverole, soja, lupin) ou sous forme de fourrages (luzerne, trèfle). La principale caractéristique biologique des légumineuses est de s'associer à des bactéries du sol (Rhizobiacées), ce qui entraîne la formation de nodosités ou de nodules dans lesquels ces bactéries transforment l'azote atmosphérique en une forme assimilable par la plante (**Mylona et al., 1995**). Cela leur permet d'obtenir une grande quantité de protéines végétales sans fertilisation azotée, ce qui leur offre également un intérêt dans le cadre d'une agriculture durable (réduction des intrants) (**Journet et al., 2001**). Dans la région méditerranéenne, ces plantes occupent une place importante en raison de leur intérêt agro-économique et environnemental. En effet, les légumineuses ont une influence très favorable sur la fertilité des sols en contribuant à l'incorporation de l'azote dans les écosystèmes et en offrant des possibilités d'amélioration de la qualité de l'eau (**Boudanga et al., 2014**).

Les légumineuses alimentaires constituent une source importante de nutrition humaine vue leur richesse en hydrates de carbones, en vitamines, en éléments minéraux et principalement en protéines végétales qui peuvent corriger le déficit en protéines animales (**Ben Mbarek et al., 2009 ; Shaht et al., 2008**).

En plus de leur valeur alimentaire et nutritionnelle, les légumineuses peuvent avoir un impact significatif sur la prévention et la gestion de divers problèmes de santé,

notamment les maladies chroniques. La diversité alimentaire requise est apportée par les légumes secs (Tableau I). Ils jouent donc un rôle essentiel dans la nourriture humaine, en fournissant une source très importante de protéines, de différents acides aminés et de vitamines du groupe B, de fer, de zinc, de magnésium et de sucre.

Tableau I. Valeur nutritionnelle de quelques légumineuses en g pour 100g de MS

Légumineuses	Nutriments				
	Protéines	Lipides	Glucides	Fibres	Minéraux
Haricot	26,2-43,6	1-1,9	60-65	4 -5	3,0-4,9
Niébé	25,0-26,3	1,62-1,7	68-69	4-7,4	3,9-4,2
Soja	37,6	18,3	6,3	22,0	4,69
Pois chiche	19,4-20	5-5,6	54,9-58	-	4

Source : **Ait Saada et al. (2016)**

En plus, les légumineuses sont de bon précédents culturaux dans les systèmes céréaliers, et elles devraient donc tenir une place dans les systèmes de production (**Boudjenouia et al., 2003**).

Selon (**Guinet et al., 2019**) « Les légumineuses introduites dans les systèmes de culture peuvent aussi avoir des conséquences néfastes sur l'environnement en termes de gestion de l'azote, car il y a des risques de pertes d'azote minéral, principalement par lixiviation, pendant le cycle des légumineuses et/ou pendant la période automne-hiver après leur récolte ».

Les légumineuses servent à divers usages. Elles peuvent être utilisées dans la consommation humaine comme elles peuvent être utilisées dans l'alimentation du l'animal (**Shelton, 1999**).

Les graines de légumineuses peuvent se répartir en deux groupes ; Le premier groupe correspond à des graines riches en glucides, et notamment en amidon (40-50% du produit sec), et pauvres en matières grasses (1-6% du produit sec), et c'est le groupe le plus important dont les espèces les plus importantes sont le pois, la fève, les haricots secs, le pois chiche, les lentilles. Le second groupe correspond à des graines plus riches en matières grasses et contenant peu d'amidon. Ce groupe rassemble notamment le lupin et le soja qui contiennent respectivement 10 et 20% de lipides (**Rémond et Walrand, 2017**).

I.2. Intérêts agronomiques des légumineuses

Les intérêts agronomiques des légumineuses alimentaires sont liés à leur valeur agronomique comme précédents culturaux à blé. Elles présentent dans ce sens les avantages suivants :

- pouvoir fixateur de l'azote atmosphérique (N₂).
- pouvoir améliorateur des caractéristiques physiques du sol, et de la qualité du grain du blé.
- possibilités de lutte chimique efficace contre certaines adventices nuisibles aux céréales (Folles avoines et Bromes en Algérie, par exemple) et certaines maladies cryptogamiques inféodées aux céréales, (*piétin-échaudage* par exemple).

I.3. Intérêts nutritionnels

Les protéines des graines sont localisées au niveau des cotylédons et de l'embryon. La qualité des protéines des légumineuses alimentaires varie en fonction de leur teneur en acides aminés, de leur valeur biologique et de leur digestibilité. Elles complètent, sur le plan nutritionnel celles des céréales (blé, maïs et riz) et améliorent la valeur alimentaire de la ration. Ainsi, les protéines des légumineuses sont riches en lysine et sont par contre déficitaires en acides aminés soufrés. Les céréales sont, en revanche, riches en acides aminés soufrés mais pauvres en lysine. Les protéines des légumineuses sont donc un bon complément pour les protéines des céréales (**Gaudichon., 2016**).

I.4. Intérêt zootechnique

Les légumineuses alimentaires présentent aussi un intérêt pour les ruminants. Ainsi, l'Afrique du nord et l'Asie de l'Ouest produisent annuellement près de 6 millions de tonnes de pailles de légumineuses (**Agrichem., 2019**). Cette masse contribue par 1% dans la ration alimentaire du cheptel de la zone (bovine + ovine + caprine) contre 30% pour les pailles des céréales. La paille des légumineuses alimentaires (surtout lentille) est plus riche en protéines brutes que les pailles des céréales (**Da Siva et al., 2015**). La paille de la lentille est largement utilisée en Syrie comme foin en hiver dans l'alimentation des brebis.

I.5. Intégration dans les systèmes de cultures.

I.5.1. Rotation des cultures avec des légumineuses

Les légumineuses alimentaires sont donc des cultures indispensables aux rotations céréalières. Le rendement du blé en sol pauvre en azote (ou en matière organique) est souvent faible et surtout instable en cas d'une culture continue du blé (rotation: blé-blé). Il est par contre plus élevé et plus stable dans le temps dans le cas d'une rotation : légumineuses - blé sous les mêmes conditions.

L'introduction des légumineuses dans la rotation avec les céréales d'hiver permet aussi une maîtrise efficace de certains adventices nuisibles et difficiles, actuellement, à combattre chimiquement en culture du blé. Ainsi, le désherbage chimique des parcelles de lentille à la Trifluraline, permet de réduire fortement l'infestation du blé suivant par la folle -avoine.

I.5.2. Cultures possibles en association

L'agriculture a toujours émergé accompagnée de la domestication de légumineuses (Selosse., 2016). Aujourd'hui, l'agro écologie prône la réintroduction d'une plus grande diversité d'espèces cultivées comme une stratégie clé pour tenter de s'affranchir des intrants de synthèse en général et des produits phytosanitaires en particulier. Ces associations de plantes constituent un vaste domaine de recherche et d'expérimentation qui reste encore assez méconnu.



Figure 1. Différents types d'associations avec des légumineuses (Philippe Monchaux, communication personnelle).

I.6. les avantages de l'introduction de légumineuses

- L'amélioration de la fertilité azotée et de la structure des sols : Les légumineuses utilisent leur capacité de fixation symbiotique de l'azote atmosphérique, lorsque l'azote est rare à l'origine dans le sol ou bien lorsqu'il le devient comme dans le cas d'une association. Pour une légumineuse récoltée ou pour la couverture du sol, le fauchage peut servir de paillage .La restitution de cette matière organique au sol permet de restituer les nutriments assimilés lors de la culture.
- De plus, les légumineuses présentent fréquemment des racines robustes et profondes. Ce genre de réseaux racinaires encourage une décomposition du sol significative et profonde, ce qui accroît la porosité du sol et facilite l'infiltration de l'eau et de l'air.
- La régulation des ravageurs et l'attraction des auxiliaires : l'association de cultures complexifie la structure du couvert, augmente la diversité botanique et peut ainsi induire une confusion aussi bien visuelle qu'olfactive chez certains ravageurs. Cette complexification va altérer la capacité des insectes à trouver la plante hôte et donc à se développer dans ces mélanges (**Corre-Hellou et al., 2014**).
- l'amélioration de la gestion des herbes indésirables.
- l'amélioration de l'activité biologique des sols.

I.7. La production des légumineuses dans le monde

Quelles que soient les années, la fève et féverole occupent la meilleure place en production comparativement aux autres espèces de légumineuses alimentaires. Le haricot sec, la lentille et le pois sec présentent de faible production. La production en pois chiche occupe la deuxième place après la fève et féverole. (**Mealkhessuo., 2007**).

I.8. La consommation mondiale des légumineuses

Depuis 50 ans, la consommation mondiale de légumineuses connaissait une tendance lente à la baisse aussi bien dans les pays en voie de développement que dans les pays développés (**Fao., 2012**). La consommation de blé, de soja ou de riz ainsi que de produits laitiers et de viande progressait beaucoup plus vite.

I.9. Situation des légumineuses en Algérie :

En Algérie, les légumineuses alimentaires (légumes secs), font partie du paysage agricole depuis des millénaires (**Tabet et Zaibet., 2022**). Parmi les espèces de légumineuses cultivées en Algérie : le pois-chiche, la lentille, la fève féverole et le haricot ont toujours fait partie de l'alimentation des Algériens. Ils interviennent de façon efficace dans le régime alimentaire, particulièrement par l'apport des protéines végétales qu'elles assurent (**Abdelguerfi et al., 1998**).

La situation des légumineuses alimentaires en Algérie se caractérise par une disparition totale du paysage agricole des grandes cultures, bien que la région soit à vocation En Algérie, les légumineuses alimentaires occupent une place importante dans les systèmes de Cultures et dans l'alimentation de la population. La production reste assez faible et les importations Sont en pleine croissance.

En Algérie, le pois chiche occupe une place importante dans le domaine agricole. En termes de surface cultivée, cette espèce occupe la deuxième place après la fève et la féverole. L'évolution de la culture de pois chiche au cours de ces dix dernières années mérite d'être étudiée et analysée. (**Rémond et Walrand, 2017**).

I.1.9.1. Production des légumineuses en Algérie

Les légumineuses sont globalement confrontées à la disponibilité limitée du P dans le sol. c'est le cas des sols Algériens situés au Nord soit en zone sub-humide ou semiarid dont le pH se varié entre 7.5 et 8.5 (Alkama *et al.*, 2009; Latati *et al.*, 2013), et sont pour la majorité (70 à 80% en zone semi-aride) riche en calcaire avec un taux de calcaire (Djili *et al.*, 1999), Ces par conséquence sont carencés en P et ont une efficacité faible en ce qui concerne l'utilisation du P ajouté dans le sol à travers l'utilisation des engrais phosphatés (Hinsinger 2001), En effet, la grande partie du P appliquée sera convertie en formes non-disponibles (i.e. non phytoassimilable) et ne sera pas facilement utilisée par la plante (Valantin-Morison *et al.*, 2014).

L'Algérie produit en moyenne 800 000 à 900 000 quintaux de légumineuses ce qui répond aux besoins de 30 à 35%. La production mondiale de légumineuse, atteindrait 80 millions de tonnes par an, avec comme principaux producteurs l'Inde (22 millions de tonnes), le canada (8 MT), la Birmanie (6 MT) (**Mealkhessuo., 2007**).

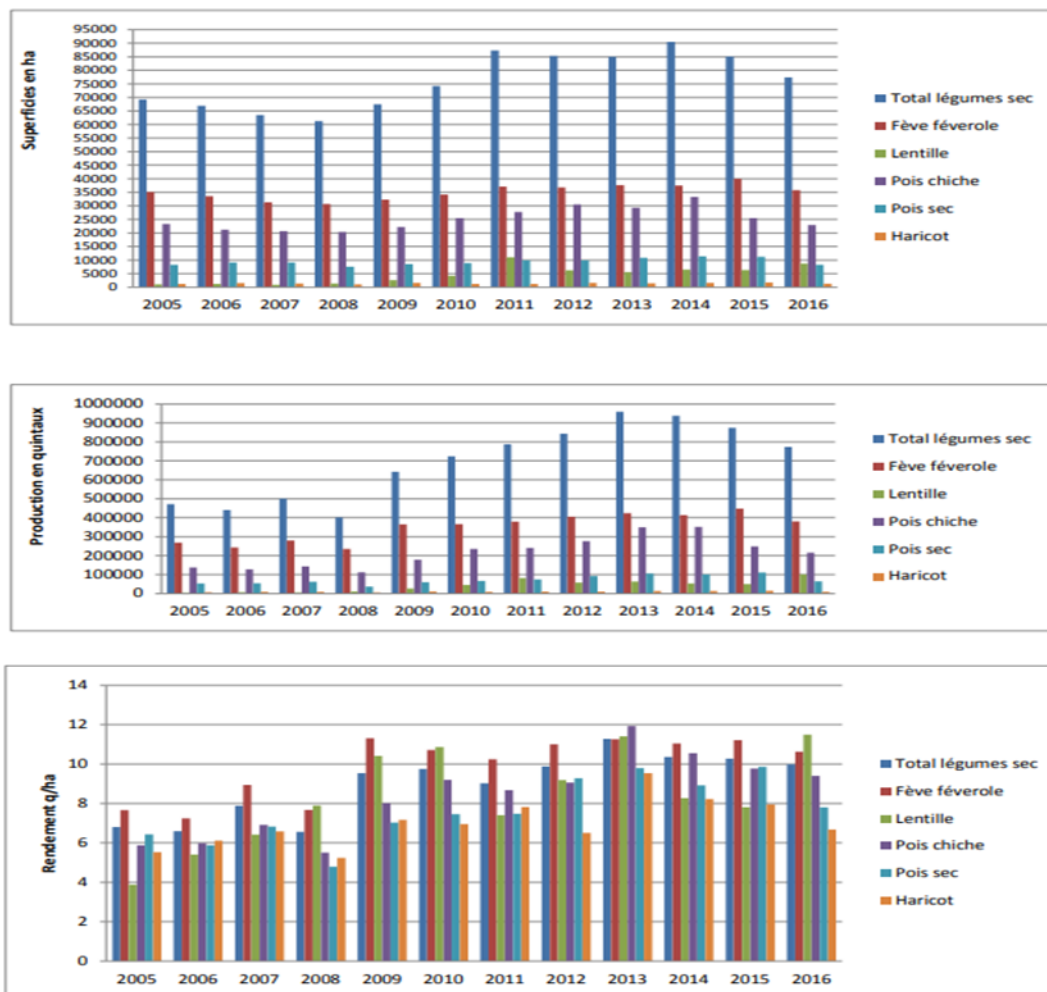


Figure 2. Evolution des superficies, productions et rendements de légumineuses alimentaires durant la période allant de 2005 à 2016 (Statistiques MADRP-DSASI)

1.1.9.2. La diminution de la production des légumineuses en Algérie

Les rendements des légumineuses en Algérie restent réduits en raison de différentes contraintes, telles que (Graham, 1981; Bennanie et al., 2005) :

- le déficit hydrique
- la salinité
- les fluctuations de température
- Ainsi que la faible teneur des sols en minéraux, notamment en P, des systèmes de culture, ou du contexte socioéconomique

- l'absence de variétés adaptées et productives (**Boudjenouia et al., 2003**).

Zaghouane (1997) a signalé que, bien qu'elle ait bénéficié de plusieurs programmes de développement, la production de légumineuses alimentaires, n'a pas connu l'évolution escomptée tant sur le plan des superficies que celui de la production.

Chapitre II: La culture de la féverole

II.1. Généralité

La féverole (*Vicia faba* L.) est l'une des légumineuses les plus importantes cultivées pour sa teneur élevée en protéines et son adaptabilité à diverses conditions (Attia., 2023). La superficie cultivée de la féverole dans le monde s'élevait à 3,7 millions d'hectares en 1980 et est tombée à 2,1 millions d'hectares en 2014 (FAO, 2017).

Le grain de féverole est riche en protéines de qualité supérieure et en nutriments essentiels, ce qui en fait un aliment précieux pour les animaux (Robinson., 2019). De plus, les féveroles permettent aux agriculteurs de varier les cultures en raison de leur croissance rapide, ce qui leur permet de produire un fourrage à haute valeur nutritive et appétissant sur une courte période (Koivisto et al., 2003).

II.2. Origine et évolution

L'origine et la domestication de la fève sont peu connues, malgré de nombreuses recherches (Maxted et al., 1991). Selon Cubero (1973), le Proche-Orient est son point de départ, et quatre voies s'étendent de ce point de départ : (1) vers l'Europe ; (2) long de la côte nord-africaine vers l'Espagne ; 3) le long du Nil jusqu'à l'Éthiopie ; (4) de la Mésopotamie à l'Inde. On pense qu'il y a eu des centres secondaires de diversité en Afghanistan et en Éthiopie. Toutefois, selon Ladizinsky (1975) l'origine était en Asie centrale.

L'ancêtre sauvage de *V. faba* n'est pas connu (Muratova., 1931). Le plus proche parent sauvage de *V. pliniana* (Trabut) Murat d'Algérie est *V. faba* (Muratova., 1931). Le voyageur a découvert un autre hypothétique ancêtre, *V. faba paucijuga* (Alefeld., 1866). Hopf (1973) suggère qu'un ancêtre sauvage de *V. faba* est probablement *V. narbonensis* L.

V. faba possède 14 chromosomes diploïdes, tandis que tous les proches de *V. faba* possèdent 12 chromosomes diploïdes. Cependant, l'ensemble des données issues des études moléculaires suggèrent une grande disparité génétique entre *V. faba* et les autres espèces de *Vicia* (Fennell et al., 1998). Les fleurs de la féverole sont appelées papilionacées, c'est-à-dire qu'elles sont de forme papillonnelle. Par l'évolution cette caractéristique a été ajoutée afin de faciliter le travail des pollinisateurs, indispensables à sa reproduction.

Dès les premiers temps de l'agriculture, la féverole est cultivée au Néolithique dans le croissant fertile du Proche-Orient il y a 7 000 ans. Les Grecs connaissent les fèves elles sont mentionnées dans l'Odyssée et dans la Bible. Dans notre culture, les fèves ont un fort symbolisme qu'elles ont maintenu jusqu'à nos jours.

II.3. Classification botanique de la féverole :

D'après **Reta Sanchez et al (2008)**, la féverole est une espèce de légumineuses (Leguminosae) du genre *Vicia* qui possède $2n = 12$ chromosomes. La variabilité morphologique de cette espèce est assez importante (poids, forme, coloration du grain, taille des végétaux).

Selon **Wojciechowski et al (2004)**, cette classification a été décrite comme suit :

Règne : *Plantae*

Sous-Règne : *Tracheobionta*

Division : *Magnoliophyta*

Classe : *Magnoliopsida*

Sous-Classe : *Rosidae*

Ordre : *Fabales*

Famille : *Fabaceae*

Genre : *Vicia*

Espèce : *Vicia faba*

La fève possède une graine parmi les plus grandes. Deux sous-espèces sont identifiées en fonction des dimensions de la fève :

- *Vicia faba major*, également connue sous le nom de fève, a une graine aplatie de 2 à 3 cm de long.
- *Vicia faba minor* présente une graine plus petite, plus ou moins cylindrique ou ovoïde, légèrement comprimée.

Il y a une grande variété de grosseurs parmi les cultivars de féverole, car les variétés à très petit grain peuvent avoir une masse de moins de 300 g par mille grains, tandis que celles à très gros grains peuvent atteindre plus de 700 g.

En dehors de quelques variétés anciennes cultivées en Algérie, il y a eu très peu de matériel sélectionné aux agriculteurs. La population locale Sidi Aiche est la variété la plus répandue chez les agriculteurs (ITGC., 1998).

II.4. Caractéristiques de la plante

Les plantes sont érigées, on connaît des cultivars à croissance indéterminée et déterminée, et ceux à croissance déterminée mesurent entre 2 et 7 pieds de haut (De Costa et al., 1997 ; Hickman et Canevari, 2012 ; Preston et Isely, 2012). Les tiges sont carrées et creuses, il peut y avoir une seule tige ou plusieurs qui se ramifient à partir de la base pour former un port buissonnant. Les feuilles sont composées, de 4 à 7 pouces de long, avec 3 à 7 folioles et sans vrilles. Les stipules des feuilles ont un nectaire extra floral pourpre sur la face inférieure. Les fleurs sont parfumées, portées en grappes sur de courts pédoncules à l'aisselle des feuilles.

Les pétales vont du blanc au violet et peuvent avoir des taches noires, brun foncé ou pourpres. Les fleurs ont dix étamines, dont neuf sont soudées et le dixième est libre. L'ovaire est placé au-dessus des étamines et le style est incliné vers le haut et porte un groupe de poils près du stigmate. L'extérieur de la gousse est lisse, vert et de forme cylindrique avec un intérieur recouvert de laine qui peut contenir jusqu'à 10 graines.

Une fois que la graine est mûre, les gousses sèchent et deviennent brun foncé ou noires. La taille des graines est très variable, et la couleur des graines matures peut aller du crème au brun, en passant par le rougeâtre, le verdâtre et le violet, avec un grand hile de couleur foncée.

Le système racinaire se compose de plusieurs racines latérales en plus d'une racine pivotante large et peu profonde, bien que l'on sache que l'architecture racinaire varie d'un cultivar à l'autre. Les cultivars de fève dont le système racinaire est plus profond présentent généralement une meilleure tolérance à la sécheresse (Ingram et al., 1997 ; Zhao et al., 2017).



Figure 3. Photo de partie de plante de la fève (*vicia faba L.*).



Figure 4. Les différentes tailles de la graine de fève (*vicia faba L.*).

II.5. Adaptation

Il existe un grand nombre de cultivars adaptés localement et de races terrestres de fève en raison de sa longue histoire de domestication et de la pression de sélection dans des zones géographiques distinctes. Une certaine pollinisation croisée se produit et se situe entre 4 et 84% (**Torres et al., 2006**). La fève peut pousser sur des sols plus lourds que la vesce (*Vicia spp.*) et le pois (*Pisum spp.*) (**UCANR, 2019**) et tolère

généralement une variété de types de sols, mais elle pousse mieux sur les sols argileux et limoneux bien drainés, ainsi que sur les sols sablonneux suffisamment humides. La plage de pH pour la croissance de la fève se situe entre 6,5 et 9. Les mauvaises performances sur les sols mal drainés et acides sont souvent attribuées à des échecs de nodulation (**Jensen et al., 2010**). Le système racinaire relativement superficiel signifie que la fève dépend de la disponibilité de l'eau dans les 12 à 18 pouces supérieurs du sol (**Caracuta et al., 2015**). La tolérance à la sécheresse varie considérablement d'un cultivar à l'autre, les cultivars du nord de l'Europe présentant une moindre tolérance à la sécheresse et des racines latérales moins profondes que les cultivars du sud de l'Europe (**Zhao et al., 2017**). La sensibilité à la sécheresse est la plus forte au moment de la floraison et pendant le remplissage des gousses (**UCANR, 2019**).

La fève est une plante à jours longs qui est cultivée comme plante annuelle d'hiver dans les régions tempérées chaudes et subtropicales, et comme culture de saison chaude dans les régions plus froides. Les températures optimales du sol pour la germination se situent entre 60 et 65° F. La germination ne se produit pas à des températures inférieures à 40° F ou supérieures à 76° F, bien qu'il y ait des différences entre les cultivars (**Jensen et al., 2010**). Les cultivars les plus rustiques du bassin méditerranéen peuvent tolérer des températures hivernales aussi basses que 14° F et les cultivars européens les plus rustiques ont un plancher de 5° F. La tolérance au froid est un problème dans certaines régions des États-Unis continentaux et la sélection de cultivars tolérant une gamme de températures plus large est un objectif du programme de recherche sur la féverole de l'USDA-ARS, de même que la sélection de cultivars à petites graines qui peuvent être facilement plantés avec des planteurs de maïs et de plantes de couverture (**Hu et al., 2009 ; Landry et al., 2015**). Les températures optimales pour la croissance sont comprises entre 65 et 85° F, tandis que les températures supérieures à 90° F limitent la croissance et les rendements (**Landry et al., 2015a ; Jensen et al., 2010**).

II.6. Utilisations

II.2.6.1. Culture commerciale - Consommation humaine

Les fèves sont un aliment de base dans la région méditerranéenne notamment en Égypte, en Syrie, en Irak, en Iran, dans le nord de l'Inde, au Pakistan et dans le sud de la Chine. En Europe et aux États-Unis, les fèves immatures à grosses graines sont consommées fraîches, avec ou sans leur tégument. En Égypte et dans d'autres pays arabes, les fèves à petites graines sont utilisées dans le plat national. En Europe du Sud et en Asie du Sud-Est, les fèves sont consommées fraîches, séchées dans une variété de plats, ou rôties pour servir d'en-cas.). Les fèves contiennent de fortes concentrations de L-DOPA, un acide aminé utilisé dans le traitement de la maladie de Parkinson et de la dystonie répondant à la dopamine **(Crepon et al., 2010)**.

II.6.2. Alimentation animale et culture fourragère

La fève est un excellent fourrage, les plantes peuvent être pâturées ou utilisées pour le foin et l'ensilage **(Jensen, 2010 ; UCANR, 2019)**. La paille de fève est utilisée comme culture commerciale en Égypte et au Soudan **(Jensen et al., 2010)**. L'analyse de neuf lignées de fèves cultivées dans des conditions de terres arides au USDA-Natural Resources Conservation Service (NRCS) Bridger, Montana Plant Materials Center, a révélé que les protéines brutes variaient de 14 à 22% et que la valeur alimentaire relative (VAR) variait de 123 à 150%, ce qui est comparable à la VAR de la luzerne (*Medicago sativa*) **(Hensleigh, 2016 ; Tallman, 2016)**. La valeur nutritionnelle des fèves séchées est élevée et elles sont utilisées pour nourrir les chevaux, les volailles et les pigeons. Elle peut également entrer dans l'alimentation des bovins et des ovins **(Crepon et al., 2010 ; Jensen et al., 2010)**.

II.6.3. Culture de couverture

Les fèves peuvent être cultivées en tant que culture de couverture de saison froide ou chaude, en fonction de l'emplacement. Les attributs bénéfiques de la fève en tant que culture de couverture comprennent : la production de biomasse, une fixation biologique élevée de l'azote, une croissance verticale, une racine pivotante forte qui réduit l'érosion du sol, la suppression des mauvaises herbes, une bonne plante pollinisatrice, l'augmentation des populations d'insectes bénéfiques, et la facilité de résiliation et de décomposition des résidus. L'utilisation de la fève comme culture de couverture peut conduire à des rendements plus élevés dans la culture commerciale suivante **(Etemadi et al., 2018)**. D'un point de vue structurel, la fève est un élément

important des mélanges de cultures de couverture, car ses tiges robustes et son port érigé permettent aux plantes grimpantes telles que les pois et la vesce d'être mieux soutenues et d'augmenter la quantité de biomasse produite. La production de biomasse de la fève peut être supérieure à celle de la plupart des légumineuses. . Les niveaux élevés d'azote dans les résidus conviennent aux cultures suivantes ayant un besoin élevé en azote, bien que pour les cultures nécessitant peu d'azote, l'utilisation de la féverole pourrait entraîner une croissance végétative excessive et même une lixiviation des nitrates (**Kopke et Nemecek, 2010**). La fève forme des associations mycorhiziennes et augmente la disponibilité du phosphore dans les sols (**Kopke et Nemecek, 2010**).

II.7. Importance de la production de la féverole à travers le monde

La Chine Le Royaume-Uni, l'Éthiopie et l'Égypte sont des pays producteurs de premier plan.

Les principaux exportateurs de féverole sont l'Australie, le Royaume-Uni et la France. La Chine est en tête de la production mondiale de fèves et de féveroles, avec une production de 1,42 millions de tonnes. L'Éthiopie est suivie par le Royaume-Uni avec 0.83 millions de tonnes, la France avec 0.31 millions de tonnes et l'Australie avec 0.28 millions de tonnes (**Statistiques 2014/2015, Sources : Terres Univia, FAO, ABARE, sources professionnelles européennes et Eurostat**).

La féverole est principalement cultivée en tant que légume sec ou frais. Elle fait partie intégrante de l'alimentation humaine dans de nombreux pays, tels que la Chine, l'Égypte (Moyen-Orient) et le Maghreb.

En Europe, au contraire, la féverole est principalement utilisée pour l'alimentation des animaux d'élevage. L'Italie et l'Espagne sont les plus grands consommateurs du continent, notamment pour leurs ovins et bovins.

II.8. Importance de la culture de la féverole en Algérie

La culture des fèves n'a pas connu de croissance en superficie entre 2005 et 2016 (MADR-DSASI), avec une moyenne annuelle de 35 163 ha. Toutefois, sa culture représente la part la plus importante des légumineuses alimentaires, représentant 46,21% des terres qui lui sont attribuées. De plus, la production reste insuffisante avec une moyenne de 350 765 quintaux, avec des niveaux de rendement très bas avec une

moyenne de 9,92 q/ha.

Il est important de souligner que les statistiques officielles ne font pas de distinction entre la fève et la féverole, mais il est connu que la culture de la fève est la plus répandue. La féverole qui était autrefois plus cultivée n'est plus.

La féverole occupe encore peu de surface, bien qu'elle puisse s'intégrer aisément dans les systèmes de production des grandes zones. Sa progression est entravée par les coûts élevés de son exploitation causés par une gestion manuelle.

Tableau II. Evaluation de la superficie et production de la fève et féverole en Algérie (FAOSTAT., 2015).

Compagne agricole	Superficie (ha)	Production (qx)	Rendement (qx/ha)
2000/2001	31 416	211 760	6,64
2001/2002	33 565	228 880	6,82
2002/2003	34 028	306 810	9,02
2003/2004	36 767	320 450	8,72
2004/2005	35 031	268 330	7,66
2005/2006	33 537	242 986	7,25
2006/2007	31 284	279 735	8,94
2007/2008	30 688	235 210	7,66
2008/2009	32 278	364 949	11,31
2009/2010	27 782	366 252	8,93
2010/2011	27937	2 483 465	8,92
2011/2012	30 172	2 577 002	8,75
2012/2013	30 833	2 969 634	9,80
2013/2014	30 833	2 959 716	9,61
2014/2015	30 055	2 495 373	8,37

La mécanisation est absente et cette culture est peu valorisée pour l'alimentation de l'élevage, en particulier pour l'engraissement du bétail. Selon **Maatougui (1995)**, la faible intégration de la féverole dans la ration alimentaire est due à l'utilisation d'aliments concentrés fortement subventionnés par les éleveurs.

II.9. Zone de production en Algérie

Elle est localisée principalement dans les zones de plaines côtières et intérieures à potentiel relativement important avec des pluviométries moyennes annuelles favorables entre 500 et 600 mm, notamment au niveau des wilayas de Chlef, Skikda,

Ain Defla, Tlemcen et Guelma. Selon **Maatougui (1995)**, la faible importance des surfaces dans la région des hauts plateaux est probablement attribuable au froid et à la sécheresse terminale.

II.10. Intérêt agronomique de la culture

La féverole est principalement cultivée en raison de son grain riche en protéines destiné à la consommation humaine et animale (environ 30% de lysine). Elle sert également de fourrage ou d'engrais vert. L'intérêt industriel de la féverole réside dans la production d'aliments pour le bétail, puisque les graines concassées sont employées pour l'alimentation du bétail. Selon **Kopke et Nemecek (2010)**, cela peut diminuer la dépendance envers une alimentation pour les animaux à base de concentré importée, telle que le Soja, qui est considéré comme écologiquement néfaste et plus onéreuse.

Les principales bénéfices pour l'environnement de la fève sont sa capacité à attacher l'N atmosphérique de manière symbiotique. La féverole peut être utilisée en combinaison avec une céréale pour obtenir un fourrage plus équilibré et de meilleure qualité, en remplaçant les autres associations telles que la vesce avoine. Elle assure une augmentation du rendement en grain et une amélioration de la qualité du blé (niveau de protéines).

En tant que nourriture, elle présente une teneur plus élevée en matières azotées totales et en minéraux, en particulier en calcium, par rapport aux autres graminées. En élevage de ruminants, elle favorise l'équilibre de la ration alimentaire qui repose sur les graminées énergétiques. Ils ont donc un double intérêt nutritionnel : concentration de la ration en protéines grâce à leur teneur en fibres digestibles, et rôle dans l'ingestion et la sécurité de la ration grâce à leur teneur en fibres digestibles (**Schneider et Huyghen, 2015**).

II.11. Place dans la rotation

La féverole favorise la diversification de l'agroécosystème en favorisant les rotations de cultures et les cultures en association, ce qui entraîne une augmentation indirecte de la biodiversité liée à la flore, à la faune et aux microbes. Cependant, la majorité des conséquences sont des répercussions indirectes sur la fertilité du sol, la productivité et

la stabilité des systèmes, ainsi que sur la résilience globale des agroécosystèmes (**Kopke et Nemecek, 2010**).

Selon **Kopke et Nemecek (2010)**, la féverole joue le rôle d'une culture de repos (break crop) dans les systèmes intensifs qui sont principalement axés sur la culture des céréales en rotation. L'incorporation de féveroles dans les rotations de cultures avec des céréales améliore les propriétés du sol telles que les aspects physiques, chimiques et biologiques, réduit l'incidence des maladies et des ravageurs et diminue le besoin d'engrais azotés grâce à la fixation biologique du N₂. Il est plus facile d'en cultiver, étant donné les facilités de mécanisation et de récolte.

Selon **Hamadache (2014)**, elle est peu sensible à l'engrenage et privilégie davantage les sols caillouteux et calcaires.

La féverole peut potentiellement intégrer le système céréalier en Algérie, occupant ainsi une place importante en rotation avec le blé dur en période de pluie, en particulier dans les régions favorables. Les rotations suivantes peuvent être utilisées pour remplacer les systèmes traditionnels de jachère travaillée/blé ou de fourrage sec/blé : féverole/blé/orge (ou avoine), jachère travaillée/blé/féverole/blé et féverole (engrais vert)/sorgho fourrage/blé tendre en zone d'élevage bovin/orge (**Hamadache, 2014**).

II.12. les ennemis de la féverole

Les insectes ravageurs sont les principaux adversaires de la féverole, cela inclut les sitones, les pucerons noirs et verts, ainsi que les bruches (**Barillet., 2017**). Les graines tachées, ne pouvant être utilisées que pour l'alimentation animale.

Chapitre III: Fixation symbiotique de l'azote et déficience en phosphore

III.1. Fixation symbiotique de l'Azote chez les légumineuses

La fixation azotée symbiotique est le processus biologique qui permet de convertir l'azote de l'air ambiant (N_2) en azote minéral intermédiaire (azote ammoniacal, NH_3) qui est alors assimilable par les organismes vivants pour constituer les molécules organiques (notamment les protéines).

Les légumineuses sont les seules plantes capables d'établir une symbiose fixatrice d'azote. Une relation symbiotique s'établit entre les légumineuses et certaines bactéries présentes dans le sol. Selon les recherches sur le site (<https://www.terresinovia.fr>) « Pour la légumineuse, tout part d'un dialogue moléculaire entre la plante hôte qui sécrète des flavonoïdes et des bactéries du sol, du genre *Rhizobium* (ou parfois *Bradyrhizobium*), dont les facteurs Nod sont reconnus par la plante, ce qui déclenche le processus d'infection et la formation de petites excroissances sur les racines : les nodosités, puis la symbiose se traduit par des échanges réciproques de nutriments entre la plante et le rhizobium hébergé et transformé en bactéroïde dans la nodosité : la plante fournit sucres et énergie et elle bénéficie de l'azote minéral produit par le bactéroïde par fixation de l'air ambiant ». La souche de rhizobium et la taille des nodosités sont différentes selon les espèces de légumineuses. La couleur rosée des nodosités, bien visible lorsqu'on les coupe en deux, est un signe de bon fonctionnement (présence de leghémoglobine).

III.1.1. Effet de la composition chimique du sol sur la fixation symbiotique

Les caractéristiques chimiques du sol peuvent avoir un impact direct sur la fixation symbiotique (**Jayasundara et al., 1998**). En réalité, la composition chimique du sol est extrêmement importante pour les bactéries symbiontes, ce qui peut restreindre leur survie et les processus de nodulation.

Selon Schneider et Huyghe (2015), certains éléments chimiques peuvent influencer le fonctionnement des nodosités, que ce soit par une action directe sur la nitrogénase ou par des effets indirects sur la barrière de diffusion à l'oxygène ou sur la croissance globale de la plante.

Selon Zahran (1999), l'acidité du sol diminue la nodulation en restreignant la capacité de survie et de persistance du *Rhizobium* dans les sols. Un autre effet inhibiteur de la fixation symbiotique est causé par l'acidité des sols, qui est associée à une augmentation de la solubilisation d'ions toxiques (aluminium et manganèse). De plus, ces sols présentent généralement des carences en calcium, magnésium, phosphore et molybdène (**Schneider et Huyghe, 2015**).

L'alcalinité des sols affecte négativement la fixation car elle est en général associée à des déficiences en fer et en bore, éléments minéraux indispensables à la synthèse de la

nitrogénase, et également en P (Houassine., 2019). L'importance de ce dernier réside dans son lien avec le métabolisme énergétique (ATP) et la production de macromolécules phosphorylées dans les nodosités (Mus et al. 2016).

La majorité des sols du nord de l'Algérie présentent un pH alcalin (entre 7,5 et 8,5), ce qui est perçu comme un obstacle à la croissance et à la nodulation des légumineuses (Alkama et al., 2009 ; 2012).

III.1.2. Nodosité

Définition des nodosités :

Les nodosités ou nodules sont des organes végétaux que certaines plantes développent pour améliorer leur nutrition d'eau. Ces bactériocécidies se forment, sous l'action de bactéries symbiotiques fixatrices de l'azote atmosphérique, essentiellement sur les racines de nombreuses espèces de plantes (Fabacées appelées aussi Légumineuses, Ulmacées, Bétulacées, Casuarinacées, Eléagnacées, Myricacées, Rosacées, etc.), mais aussi sur leurs tiges (Aeschynomene et Sesbania rostrata de la famille des Fabacées) ou sur leurs feuilles (quelques genres chez les Rubiacées, Myrsinacées, Dioscoreacées).



Figure 5. Photo de nodosités sur des racines de féverole

Une légumineuse à forte efficacité d'utilisation du P pour la fixation symbiotique pouvant noduler dans un sol pauvre en P assure la nutrition N de la plante pour sa photosynthèse et la croissance qui en dépend. résulte en particulier au niveau racinaire, une stimulation des divers mécanismes de la stratégie externe d'acquisition du P qui en retour augmenteront la fixation d'azote via la biodisponibilité du P pour la

symbiose rhizobienne.

L'interaction Rhizobium-Légumineuse est caractérisée par la spécificité avec laquelle elle s'établit. En général, chaque légumineuse ne peut être infectée que par un nombre restreint de souches de Rhizobium et réciproquement, chaque souche de Rhizobia ne peut infecter qu'un nombre limité de genres de légumineuses (**Figure 6**),

La fixation symbiotique de l'azote est un processus qui permet de produire des substances protéiques à partir de l'azote gazeux présent dans l'atmosphère et l'environnement (**FAO., 2012**).

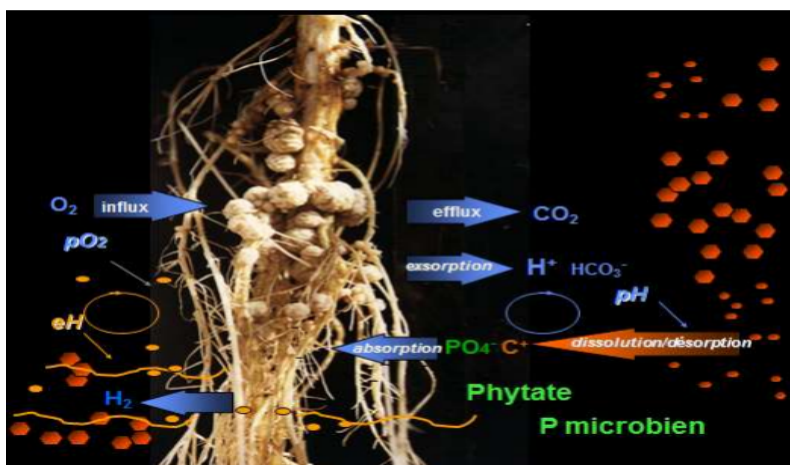


Figure 6. Cercle vertueux de fertilité du sol par couplage des cycles biogéochimiques de N et P via la fixation d'azote.

III.3. Les associations avec les légumineuses

C'est la culture en même temps de deux espèces ou plus, sur la même surface, pendant un temps considérable de leur existence (**Wilson., 1979**). L'association Cultures céréalières-légumineuses des espèces établit des relations négatives (compétition) ou positives (facilitation) et la complémentarité des niches) pour exploiter les ressources dans le milieu.

Les associations de cultures sont utilisées depuis l'aube de l'agriculture mais elles ont progressivement disparu avec l'intensification des agroécosystèmes, durant le 20ème siècle, au profit de systèmes fondés sur des peuplements cultivés mono spécifiques.

Ces systèmes sont actuellement remis en cause avec l'émergence des préoccupations d'économie d'intrants, la nécessité d'améliorer l'efficacité des facteurs de production et de préserver l'environnement et la biodiversité. En France, on estime à seulement 50 000 hectares la surface des associations céréale-légumineuse, Elles sont principalement destinées à l'autoconsommation dans les élevages en agriculture biologique. La performance des associations de cultures est généralement évaluée par (Fabre., 2005):

- Le rendement, la biomasse
- La qualité (taux protéique,...)
- Le LER = Land Equivalent Ratio

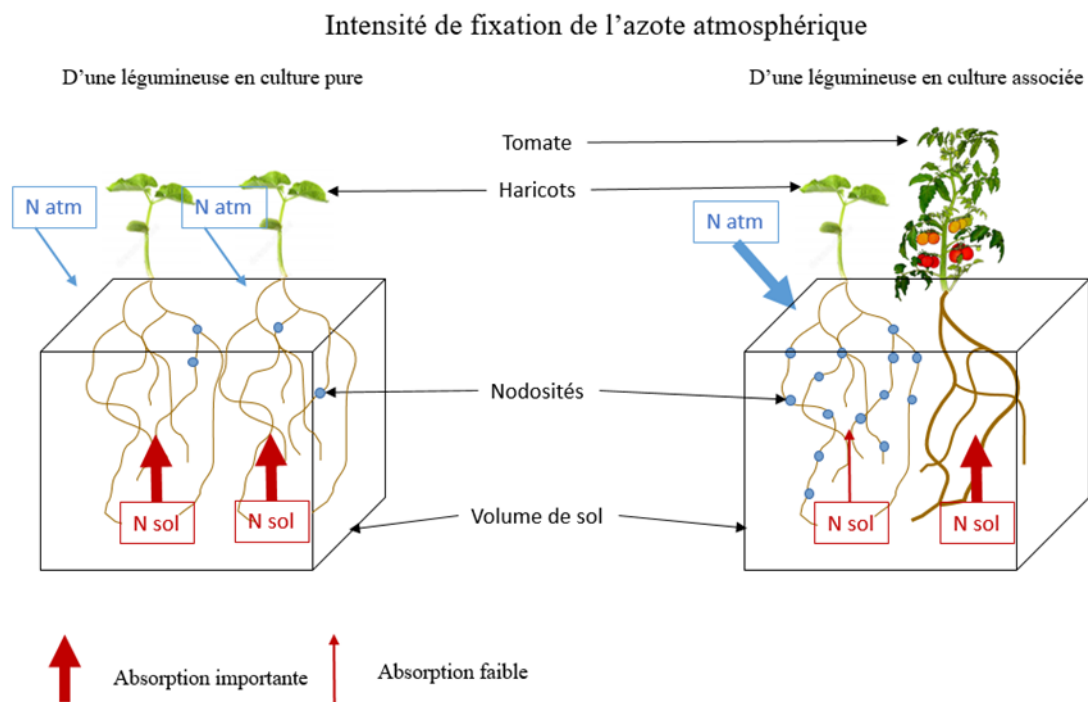


Figure 7. Différence de fixation symbiotique en culture pure et en association (d'après Justes et al., 2014).

Dans cet exemple, la tomate est une plante gourmande qui va rapidement puiser l'azote minéral du sol et obliger ainsi la légumineuse à exprimer son plein potentiel de fixation symbiotique pour subvenir à ses besoins en azote.

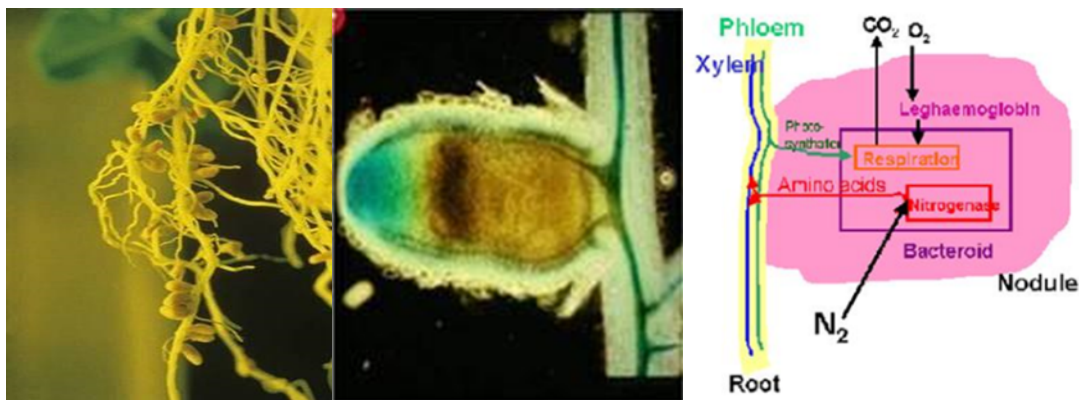


Figure 8. La symbiose : des échanges réciproques de nutriments entre la plante et le rhizobium hébergé et transformé en bactéroïde dans le nodule.

On estime que l'azote devient limitant dans le sol quand son stock atteint 50kg/ha. A ce seuil, la plante déclenche la symbiose et les nodosités se forment. Si le sol est pourvu en azote, la plante le prélèvera en priorité, car cette absorption lui demande moins d'énergie que la fixation symbiotique. Pour mettre en place la symbiose, les légumineuses ont besoin de phosphore. Par la suite, pour faire vivre cette symbiose, il faut veiller à ce que la plante ait à sa disposition du potassium qui favorise la circulation de la sève dans la plante et donc les échanges avec les bactéries symbiotiques.

Cependant, le fonctionnement de la symbiose peut être réduit par différents facteurs :

- La salinité du milieu.
- L'acidité.
- La quantité de phosphore.
- Ou encore les carences en molybdène.

La relation symbiotique est donc sensible et le milieu joue un rôle important dans son bon déroulement.(Roche et al,1990).

III.4. L'Azote et le phosphore

III.4.1. L'Azote (N)

L'azote est aussi un élément majeur des enjeux environnementaux. Trois sources sont à l'origine des composés azotés actifs sur la planète : la fixation symbiotique, la production industrielle d'engrais et les processus de combustion. L'encadré 6.1 illustre et quantifie le détail des flux concernés.

Actuellement, l'azote présent dans les systèmes agricoles et issu de la fixation symbiotique ne représente que 50 millions de tonnes (Mt) dans le monde, 1 Mt dans l'EU-27 et 0,5. la fixation symbiotique ne suffisait plus (ni les ressources limitées d'azote fossile comme le guano), cette production exponentielle d'azote réactifs a généré un cumul d'effets environnementaux inattendus, notamment, l'une des principales régions productrices d'azote réactif.

La particularité du procédé industriel est de fonctionner à très haute température et sous très hautes pressions pour rompre la triple liaison chimique associant les deux atomes de N de l'azote gazeux et pour permettre la réaction avec l'hydrogène. Ce processus, qui mobilise du gaz naturel comme source d'énergie et d'atomes d'hydrogène, est donc très énergivore puisqu'il faut 2 kg équivalent pétrole pour fixer 1 kg d'azote sous forme d'ammonitrate. En plus de la consommation accrue en énergie non renouvelable, cinq menaces majeures pour la société ont été identifiées par le collectif de l'ENA (European Nitrogen Assessment) : qualité de l'eau, qualité de l'air, augmentation de l'effet de serre, écosystèmes et biodiversité (**Sutton et al., 2011**).

Le N₂ est à près de 80% de l'atmosphère terrestre. Selon **Zahran (1999)**, l'azote joue un rôle crucial dans la formation de nombreuses molécules organiques, notamment les acides aminés et les protéines.

Cependant, l'azote moléculaire (atmosphérique) n'est pas absorbé par les plantes, mais il est absorbé par les racines sous forme de nitrates (NO₃⁻) ou, parfois, d'ions ammonium (NH₄⁺). Selon **Saoudi (2007)**, ces ions sont issus de la dégradation de la matière organique azotée présente dans le sol.

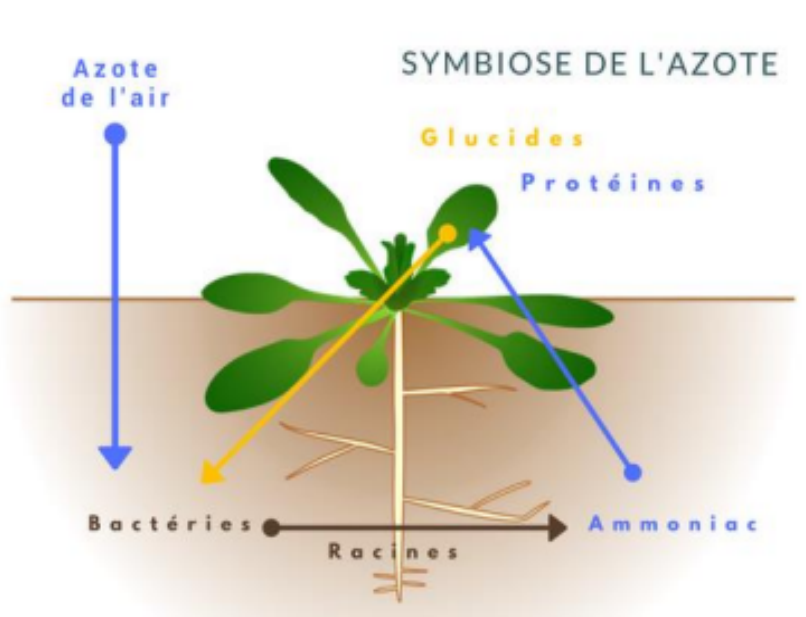


Figure 9. Cycle de Fixation d'Azote (<https://www.jardiner-autrement.fr>)

III.4.2. Le phosphore

Le phosphore est le deuxième élément essentiel à la croissance des plantes après l'azote et ne peut être remplacé par d'autres éléments. Plus de 40 % des terres arables de la planète souffrent d'une carence en phosphore disponible (Vance et al., 2003). Par ailleurs, moins de la moitié des plantes utilisent des engrais chimiques, ce qui entraîne de graves conséquences environnementales et économiques (White et al., 2012). Cet élément est essentiel pour le rendement des plantes et des cultures (Rodríguez et Fraga., 1999). Le phosphate (Pi) est la principale forme de P que les racines des plantes peuvent absorber, mais sa concentration est souvent limitée

Alors que les mécanismes impliqués dans la fixation d'azote dans les systèmes de cultures sont assez bien identifiés, ceux concernant l'acquisition du phosphore sont encore assez peu décryptés. L'introduction de légumineuses dans les systèmes de cultures représente un modèle déterminant, en raison de leur capacité à fixer l'azote atmosphérique, mais la mise en évidence d'un effet similaire pour le phosphore ouvre un nouveau champ de recherches (Graham., 2003). Par rapport aux plantes dépendantes de l'azote minéral, les légumineuses dépendantes de la fixation

symbiotique d'azote nécessitent d'importants apports en phosphore pour satisfaire les coûts énergétiques de la symbiose. Les légumineuses fixatrices d'azote sont donc plus particulièrement affectées par la faible disponibilité du phosphore. La sensibilité des légumineuses à la déficience en phosphore est généralement attribuée au turn-over énergétique du carbone et du phosphore, requis dans le métabolisme (Schulze., 2005). Relation tripartite : légumineuse-rhizobium-rhizosphère, sous influence du rhizo-microbiote et basée sur une forte dépendance de disponibilité du phosphore, la symbiose fixatrice d'azote mérite une attention particulière concernant les moyens d'accès à la principale forme de Po du sol : le phytate.

En outre, le Pi joue un rôle majeur dans la transformation de l'énergie et la régulation de diverses activités enzymatiques impliquées dans la photosynthèse, la respiration, la production d'énergie et la biosynthèse des acides nucléiques (Czarnecki et al. 2013) et la biosynthèse des acides nucléiques (Sulieman et Tran 2015). Sur la base de ces hypothèses, il devient clair que la faible disponibilité du P dans le sol impose de sérieuses limitations à la croissance et au développement des légumineuses.

Les légumineuses sont bien reconnues pour leur impact sur la durabilité des systèmes agricoles ainsi que pour leurs bienfaits nutritionnels et sanitaires. La faible disponibilité des sols en phosphore (P) est un facteur nutritionnel majeur limitant la production de légumineuses, en particulier dans les régions méditerranéennes et tropicales.

La déficience en P limite la fixation de N₂, car elle a été décrite comme ayant un fort impact sur la croissance et la survie des rhizobia et de la plante hôte. Les légumineuses ont évolué des mécanismes complexes pour faire face à la limitation en P. En réponse à la déficience en P, les plantes utilisent diverses stratégies adaptatives pour améliorer la disponibilité du P dans le sol et leur efficacité d'absorption, ce qui implique des modifications dans l'architecture des racines nodulées, l'acidification de la rhizosphère et l'induction de gènes impliqués dans l'efficacité d'utilisation du P, tels que les transporteurs de Pi à haute affinité et les enzymes phosphatases. Les réponses moléculaires, biochimiques, physiologiques et morphologiques sont déclenchées pour stimuler l'absorption de Pi dans le sol ou pour optimiser son efficacité d'utilisation et sa répartition intracellulaire sur tous les organes végétaux. Une compréhension holistique des mécanismes de la tolérance des légumineuses aux contraintes

abiotiques sera précieuse pour les stratégies visant à améliorer l’agriculture durable dans un monde où la population augmente et les ressources renouvelables en déclin (Mohamed LAZALI, Samira BRAHIMI, 2020).

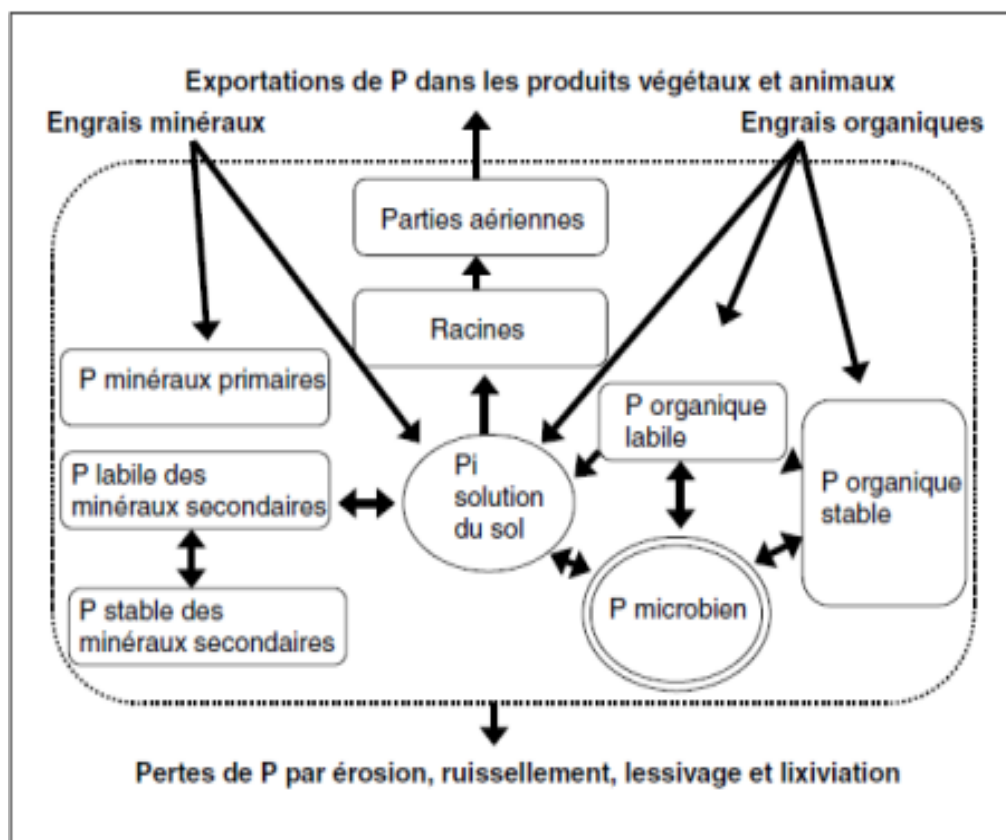


Figure10. Schémas du cycle du P dans le système sol/engrais/plante (Frossard et al., 2004)

III.5. Les quantités d’azote fixées par une légumineuse dépendent des espèces

La capacité de fixation d’azote symbiotique est spécifique à chaque espèce de légumineuse (Guinet et al., 2019). La plante va alors stocker l’azote dans ses différentes parties aériennes et souterraines. En fonction de la destination de la légumineuse, le retour de cet azote symbiotique au système (via la dégradation de la biomasse au sol) sera différent.

La Chambre d’agriculture des Pays de la Loire a mis en place depuis 2010 un essai système (Rotaleg) comparant des rotations différentes en maximisant l’introduction des légumineuses. Cet essai a permis de valider le fait que toutes les légumineuses ne se valent pas en termes de quantités d’azote fixées et restituées au sol. L’illustration ci

-dessous montre les résultats obtenus sur cet essai, au travers de la comparaison entre une féverole récoltée en grains (composé de 64 % d'azote provenant de la fixation symbiotique) et un trèfle d'interculture restitué (composé de 87 % d'azote provenant de la fixation symbiotique), la quantité d'apport net d'azote au sol est supérieur de plus de 3.5 pour le trèfle.

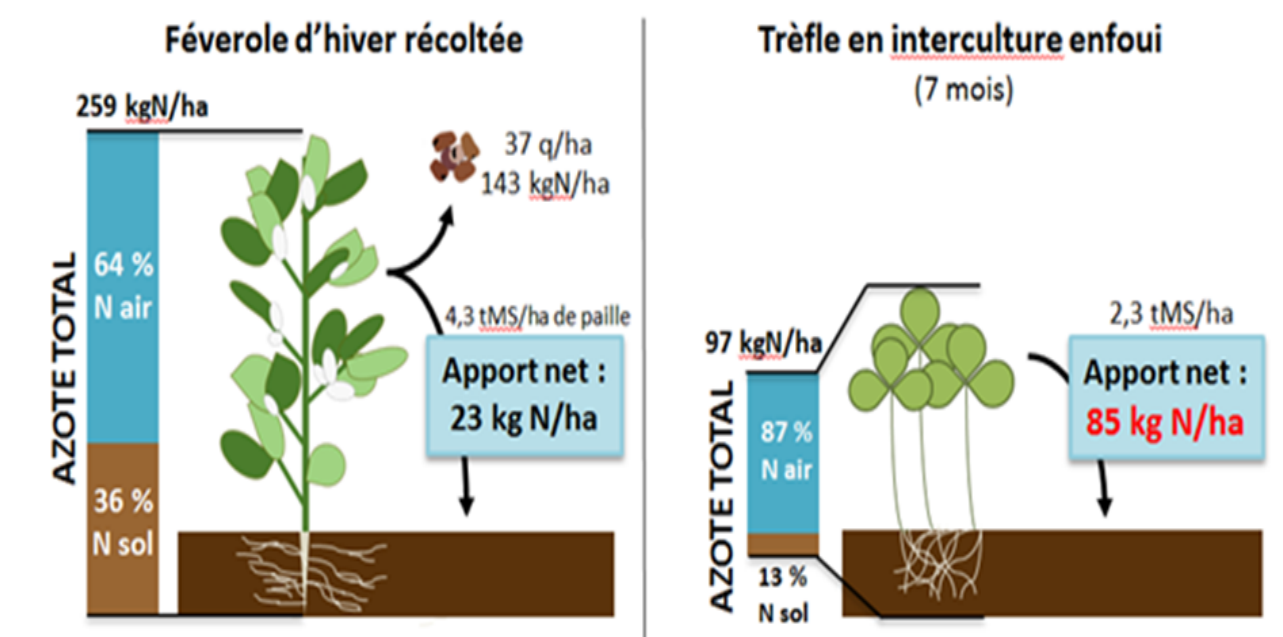


Figure 11. Comparaison entre une féverole récoltée en grains et un trèfle.

III.6. Effet de la déficience en phosphore Pi sur la fixation symbiotique de l'azote N₂ des légumineuses

Les légumineuses sont bien connues pour leurs avantages nutritionnels et sanitaires ainsi que pour leur impact sur la durabilité des systèmes agricoles, santé ainsi que pour leur impact sur la durabilité des systèmes agricoles (Lazali et al., 2020). La carence en phosphate (Pi) est un facteur nutritionnel majeur qui limite la production de légumineuses, en particulier dans les sols acides et calcaires. La carence en Pi limite la fixation de N₂, puisqu'elle a été décrite comme ayant un fort impact sur la croissance et la survie des rhizobia et de la plante hôte (Martinez et al., 2017). Les légumineuses ont développé des mécanismes complexes pour faire face à la limitation du Pi.

Le maintien de la fixation symbiotique de N₂ semble être un aspect essentiel pour assurer la productivité des légumineuses dans des environnements à faible teneur en Pi.

Lorsque les sols sont pauvres en phosphore, les légumineuses qui se basent sur la fixation de N₂ réagissent favorablement à la fertilisation avec du phosphore et présentent une augmentation de la teneur en phosphore dans les parties aériennes et les racines (**Richardson et Simpson., 2011**).

Toutefois, selon l'étude menée par Almeida et al (2000), le manque de phosphore entrave la nodulation et la fixation de N₂ davantage que la croissance des plantes.

Selon Sulieman et Tran (2015), il est suggéré que les légumineuses ont une plus grande probabilité de présenter une carence en Pi par rapport aux autres végétaux. Cela est associé à l'apparition des nodules et à la conversion énergétique, notamment pour la production de mitochondries et de symbiosomes membranaires.

Selon Noorden et al. (2016), la diminution du taux de photosynthèse, qui restreint l'apport de C aux nodules, ainsi que l'apport d'oxygène (O₂) et le stress oxydatif, peuvent également avoir un impact négatif sur la nodulation et l'efficacité symbiotique. Le manque constant de phosphore diminue considérablement la masse

Chapitre I : Recherche bibliographique

sèche de la plante, sa concentration en phosphore et en nitrates, ainsi que l'activité spécifique de la nitrogénase (**Martins et al., 2017**). Selon des recherches, il est démontré que des niveaux élevés de phosphore dans les nodules jouent un rôle crucial dans la fixation de N₂ lors de la carence en phosphore (**Almeida et al., 2000**).

III.7. Mécanismes ou stratégies d'adaptations des légumineuses sous déficience en phosphore

La façon dont les cultures réagissent à une pénurie de Pi est complexe. Des changements moléculaires, biochimiques, physiologiques et morphologiques sont observés, ce qui permet à la plante de s'ajuster à une disponibilité inférieure du Pi dans le sol et d'améliorer son efficacité d'utilisation et/ou d'acquisition (Figure 10). Selon Raghothama (1999), Hinsinger (2001) et Vance et al. (2003).

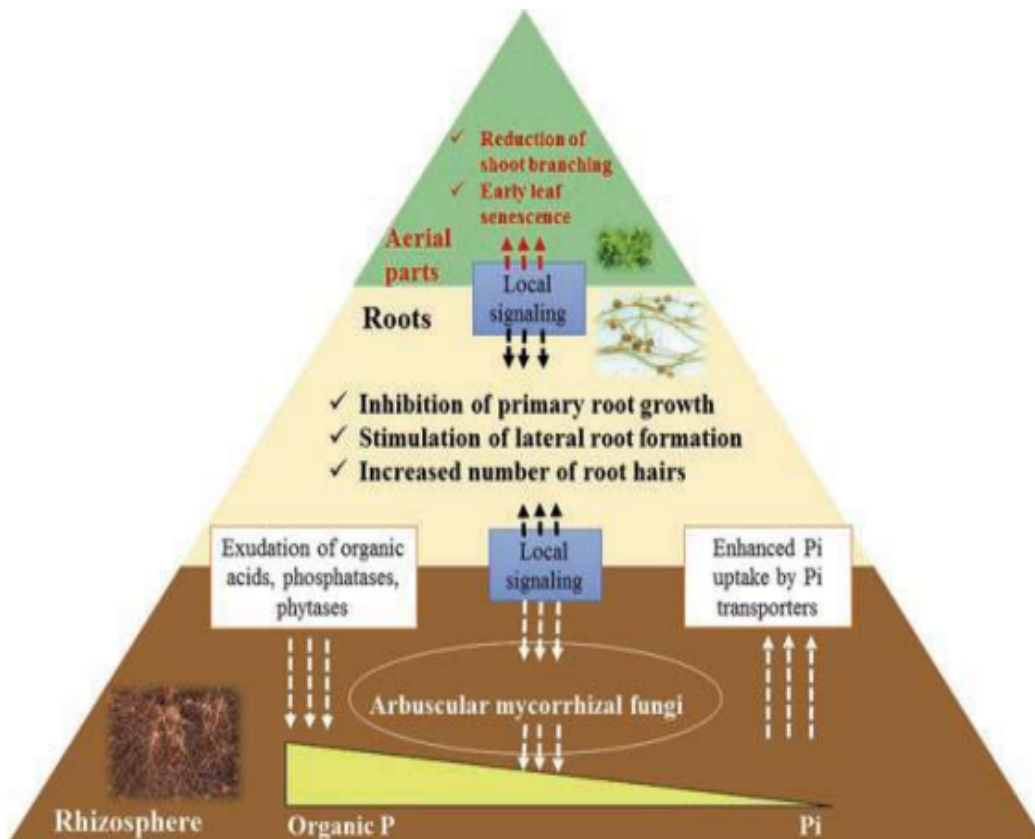


Figure 12. Schéma des réponses morphologiques, physiologiques et biochimiques à la déficience en phosphate (Pi) chez les plantes (Martins et al., 2017).

De plus, les plantes utilisent deux stratégies différentes : Il s'agit de la première, appelée externe, qui vise à améliorer l'acquisition du P en augmentant la surface

Chapitre I : Recherche bibliographique

d'échange racinaire (Anuradha et Narayanan., 1991) et en produisant des acides organiques (Ohwaki et Hirata., 1992) et des phosphatases (Hawkesford et Belcher., 1991) qui permettent de dissoudre le P insoluble du sol. La symbiose avec des champignons mycorrhiziens favorise ces processus (Mosse et al., 1976).

Selon Richardson et al. (2011), la deuxième stratégie, appelée stratégie interne, vise à maximiser l'efficacité métabolique de l'utilisation du P en générant davantage de biomasse par unité de P consommée. Par ailleurs, le choix de symbioses qui supportent la carence en P pourrait également impacter l'efficacité de l'utilisation du P en fixant du N₂ (Schneider et Huyghe., 2015).

Les espèces végétales ont des stratégies d'adaptation variées face à la pénurie de Pi, comme par exemple :. La présence de citrate élevée dans le lupin blanc (*Lupinus albus* L.) et la féverole (*Vicia faba* L.) est observée (**Li et al., 2010**), la féverole possède une grande capacité à modifier le pH de la rhizosphère (**Schubert et al., 1990**), le pois chiche (*Cicer arietinum* L.), le blé (*Triticum aestivum* L) et le maïs (*Zea mays* L.) (**Li et al., 2010**) présente une augmentation du pH de la rhizosphère et de l'exsudation du carboxylate.

Selon des recherches récentes, le stockage de N dans une association de légumineuses et de céréales est plus crucial en raison d'une plus grande efficacité dans l'utilisation de la. La symbiose rhizobienne EURS est plus efficace dans un sol faible en phosphore que dans un sol riche en phosphore (**Latati et al., 2017**).

III.7.1 Les processus biochimiques

La disponibilité du P dans la rhizosphère peut être modifiée par les racines des plantes en absorbant ou en exsudant des composés mobilisateurs du P ou en absorbant d'autres nutriments tels que le calcium Ca (**Hinsinger, 2001, Devau et al., 2010**). Différentes recherches ont rapporté une augmentation de l'exsudation de carboxylate (**Shen et al, 2003**). Selon Neumann et Römheld (1999), les racines excrurent des carboxylates qui mobilisent du P en échange de ligand, en favorisant la dissolution du ligand et en complexant des cations liés à P tels que le Ca, le Fe ou l'Al.

Selon Hinsinger (2001), les carboxylates, tels que le malate et le citrate, sont capables de mobiliser du P à partir des phosphates de calcium dans les sols calcaires, ainsi que des oxydes et hydroxydes d'aluminium (Al) et de fer dans les sols acides. En exsudant des acides organiques (**Zhang et al., 1997**), les phytases (**Lazali et al., 2013**) et les bactéries utilisant les phytates (**Jorquera et al., 2008**), il est également possible de mobiliser des ressources supplémentaires de phosphore en accédant au phosphore organique à partir du phytate. Cependant, la contribution des sécrétions racinaires à l'acquisition de Pi demeure discutée, à l'exception du lupin blanc qui produit des quantités très élevées d'acide

citrique, car les concentrations en jeu semblent trop faibles pour avoir un impact significatif (**Jones et Brassington, 1998**).

III.7.2 Les processus physiologiques

Le pH de la rhizosphère peut être modifié selon plusieurs études (**Neumann et Römheld 1999, Li et al., 2010**). La féverole possède une grande capacité de modification du pH de la rhizosphère du milieu racinaire (**Schubert et al., 1990**). Selon Hinsinger et al. (2003), cette réaction est due au rôle essentiel de l'N dans l'équilibre des cations et des anions absorbés par la plante, et, en fin de compte, au changement du pH de la rhizosphère après l'extrusion des protons pour compenser l'excès de cations dans le bilan.

Toutefois, l'accumulation symbiotique de l'N, qui se traduit habituellement par une acidification de la rhizosphère, entraîne habituellement une augmentation importante de la disponibilité du P (**Behi., 2003**). Malgré l'impact direct de la carence en Pi sur la photosynthèse, en raison d'une réduction de la capacité photosynthétique par unité de surface foliaire associée à une réduction de la surface foliaire (**Chaudhary et al., 2008**), l'allocation de Pi aux racines et aux nodules joue un rôle essentiel pour garantir la nutrition essentielle de l'N (**Magadlela et al., 2014**). Effectivement, l'augmentation de la concentration de Pi dans les nodules a un impact positif sur la nutrition azotée, tout en préservant ses dépenses photosynthétiques.

Cela illustre diverses approches pour s'adapter à la famine Pi en modifiant l'allocation de la biomasse (**Magadlela et al.2014**). La forte affinité des transporteurs de Pi dans les nodules est responsable de cette absorption accrue de Pi (**Qin et al., 2012**). Selon Schulze (2004), cela est également garanti par une augmentation de l'absorption d'oxygène, qui est essentielle pour le métabolisme des nodules, ainsi que par le bon fonctionnement de la nitrogénase. Cependant, une meilleure fixation de N₂ dans les nodules peut compenser la diminution du nombre de nodules observés dans des conditions de faible Pi (**Almeida et al., 2000**).

Selon Devau et al. (2010), l'absorption du calcium par les racines peut entraîner la libération de phosphates de calcium, ce qui peut augmenter la disponibilité de

phosphore dans le sol et favoriser l'absorption de phosphore par la plante. Puisque la consommation de calcium peut varier considérablement selon les espèces, les légumineuses absorbent généralement davantage de calcium que les céréales (**Hinsinger et al. 2011**). En même temps, l'activité des microorganismes dans le sol et des symbiontes des nodosités des racines chez les légumineuses peut jouer un rôle dans le contrôle de la disponibilité en phosphore dans un sol alcalin (**Latati et al., 2014**).

III7.3. Mécanismes de structure

Les modifications morphologiques, anatomiques et architecturales des racines constituent l'une des réponses les plus élucidées à la carence en Pi dans le but de maximiser l'absorption de Pi du sol. En réponse au déficit en Pi, les légumineuses stimulent la croissance de la racine primaire en favorisant la ramification et la formation de clusters racinaires (CR) (**Martin et al., 2017**).

Selon Martins et al. (2017), une faible concentration en Pi peut être liée à une diminution de la ramification des rameaux et à une sénescence précoce des feuilles. Grâce à la colonisation des racines par les mycorhizes, l'efficacité d'utilisation du Pi chez les légumineuses augmente et la teneur totale en N des plantes augmente (**Schulze et al., 2006**). Effectivement, la plupart des nutriments sont rapidement épuisés par les racines dans un rayon assez proche, puis elles vont chercher d'autres zones. C'est la raison pour laquelle l'évolution continue d'un système racinaire et la colonisation du sol par les racines jeunes sont des phénomènes essentiels de la nutrition minérale des plantes (**Callot et al., 1982**).

III.8. Déficience en phosphore chez la féverole

Les symptômes d'une carence en phosphore mettent du temps à se développer en raison des réserves initiales de phosphore des semences. Lorsque les symptômes commencent à apparaître, les plants de féverole déficients en phosphore ont des feuilles plus petites et une croissance plus faible que ceux qui contiennent suffisamment de phosphore.

La fève présente une carence en phosphore, ce qui se manifeste par des tiges courtes et minces, des feuilles droites et sans éclat, dont la perte est précoce et une floraison très faible. Le métabolisme photosynthétique est modifié pour la mise en circulation du phosphore minéral afin de maintenir la croissance.

Selon Hammond et al. (2004), en général et en cas de carence en P, l'architecture des racines est modifiée afin d'accroître la surface d'échange et d'explorer le sol au-delà de la zone d'épuisement autour des racines (développement de racines secondaires latérales et augmentation du nombre et de la taille des poils absorbants). La plante s'adapte également à une répartition variée du phosphore dans un sol. L'augmentation de la production de biomasse racinaire et de l'allongement total des racines est une adaptation bien connue des plantes en cas de pénurie de P.

La carence en phosphore est difficile à détecter visuellement dans les cultures de plein champ, souvent parce que toute la parcelle est touchée.

Les symptômes visuels de la féverole et de la fève apparaissent d'abord sur les feuilles les plus anciennes sous la forme d'une chlorose (jaunissement) légèrement marbrée sur une grande partie de la feuille. Ces symptômes peuvent être confondus avec une carence en azote ou en soufre, mais les feuilles moyennes et nouvelles restent d'un vert sain, de sorte que l'ensemble de la plante ne paraît pas pâle.

Selon Alkama et al. (2009), les racines nodulées de la symbiose rhizobienne de légumineuses jouent un rôle actif dans le flux des protons H^+ vers la rhizosphère, ce qui confère à la symbiose une forme d'adaptation face à la limitation en P. L'acidification de l'environnement améliorerait la capacité des parois cellulaires des racines à s'étendre et favoriserait l'évolution de ces organes. En plus de cette particularité de la symbiose rhizobienne, de nombreux travaux ont révélé des structures racinaires spécifiques chez le lupin en carence en P, des racines tertiaires fines et regroupées, connues sous le nom de racines "protéïdes".

Selon Neumann et Martinoia (2002) et Stade-Miller et al. (2001), ces racines protéïdes présentent une surface très étendue et émettent des flux importants d'acide citrique et de phosphatase dans la rhizosphère.

III.9. Influence de la carence en phosphore sur les nodosités

Les nodosités jouent un rôle essentiel dans la production de P en raison du coût énergétique élevé de la fixation symbiotique de l'azote. Effectivement, il existe une forte corrélation entre la biomasse nodulaire et la disponibilité en phosphore de la plante (**Alkama., 2010**).

La carence en P diminue le nombre de nodosités par plante (Mullen et al., 1988) et/ou la masse individuelle des nodosités (**Gunawardena et al., 1992**). Dans le cas des légumineuses, les plantes symbiotiques exigent plus de P que les non symbiotiques, car environ 20% du P total de la plante est assigné aux nodules (**Gunawardena et al., 1992**). Selon Vance et al. (2003), la concentration en phosphore dans les nodules demeure plus élevée et moins impactée par la carence en phosphore.

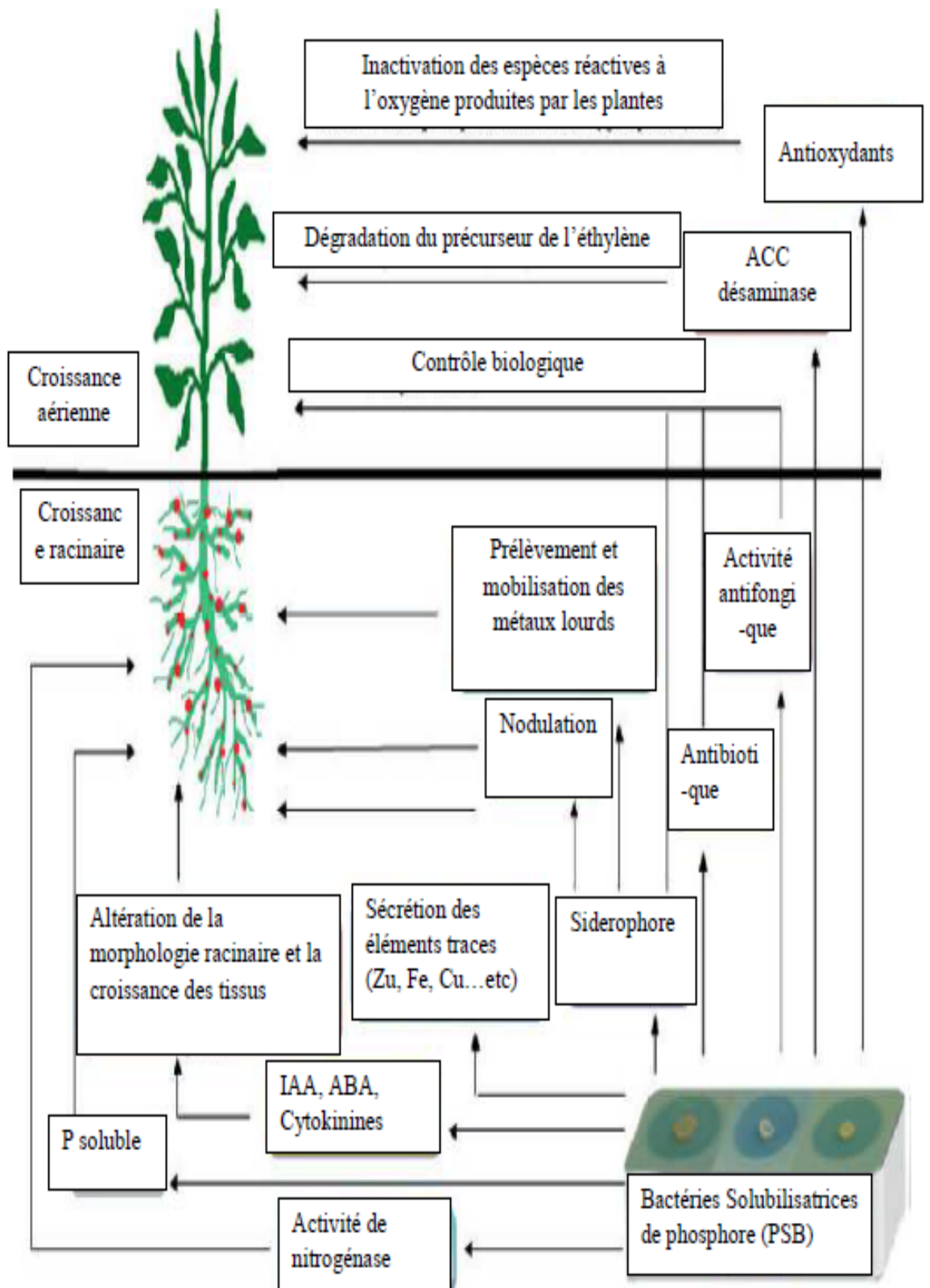


Figure 13: Mécanisme de solubilisation du phosphore dans la rhizosphère de la féverole

Conclusion générale

La bio-disponibilité de de l'azote et du phosphore est considérée comme le facteur le plus limitant du développement céréales et de légumineuses, respectivement. L'analyse bibliographique effectuée dans ce travail du mémoire de master a permis de révéler le rôle important joué par les légumineuses en générale et la féverole en particulier dans la stimulation de l'adaptation à la déficience en phosphore via la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique.

A cet effet, la fixation de l'azote par la culture de la féverole est considérée comme l'alternative pour assurer une intensification agroécologique des agrosystèmes céréaliers en Algérie soit par l'adoption des pratiques de rotation, culture de couverture ou le système en association entre la féverole et quelques espèces céréalière (avoine, blé dur et orge). Ce dernier contribue au renforcement de la durabilité et de la résilience des systèmes de production céréaliers et ouvrant ainsi la voie à la diminution de l'application des fertilisants à la fois azotés et phosphatés.

A travers la littérature consultée, notre analyse et synthèse bibliographique a révélé également que l'efficacité de la fixation de N_2 chez la féverole est largement contrôlée par la disponibilité de P et par le taux du calcaire dans le sol. De ce fait, les mécanismes d'adaptation développés par la symbiose féverole-rhizobium peuvent améliorer d'avantage la biodisponibilité du phosphore dans la rhizosphère à travers l'acidification de ce dernier durant le processus de fixation symbiotique de N_2 . De plus, il a été constaté durant cette recherche bibliographique que plusieurs processus d'acquisition de P ont été largement étudiés durant les 20 dernières années mais sont rarement étudiés par les auteurs Algériens, en particulier l'exploration du P par les racines et son solubilisation au niveau de la rhizosphère à travers le processus d'exsudation de protons et des ligands organiques par la microflore du sol.

En conclusion, cette présente recherche bibliographique a permis de nous orienter vers la réponse sur nos hypothèses de recherches formulées en introduction dont lesquelles nous pouvons suggérer l'introduction de la culture de féverole en zone sub-humide de l'Algérie sous des pratiques de rotation et d'association avec certaines espèces céréalières et même en cover crop sous le système d'agroforesterie (e.g. en intercropping avec l'olivier) afin de restaurer la fertilité des sols, augmenter

l'efficacité d'utilisation de terres agricole et surtout améliorer la production des céréales cultivées en rotation ou en association.

L'amélioration de la gamme variétale de l'espèce de la féverole à travers la sélection et la conception de variétés efficaces adaptées aux sols alcalins, calcaire et déficient en P; pourrait être considérée comme un levier innovant et une alternative prometteuses pour l'intensification agro-écologique des systèmes de cultures céréalières en Algérie particulièrement en zone sub-humide comme le Wilaya de SKIKDA.

Références bibliographiques

1. Abdelguerfi, M., & Wong, K. F., **1998**. Parallel database techniques. IEEE Computer Society Press.
2. Alefeld, F., **1866**. Die Lehre von den Kräuter-Bädern von... Friedrich Alefeld. Henser.
3. alimentaires en Algérie. Revue céréaliculture, n°30.
4. Alkama N, Ounane G, Drevon JJ. **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.
5. Alkama N., Jaillard B., Ounane S., Drevon J., **2010**. Is genotypics variation of H⁺ efflux under P deficiency linked with nodulation-root respiration of N₂-fixing common been. *Plant physiol, biochem.*
6. Alkama, N., Bolou Bi Bolou, E., Vailhe, H., Roger, L., Ounane, SM., 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 Biol Biochem.* 41, 1814-1823.
7. Almeida, JPF.; Hartwig U.A.; Fehner M. Nösberger J. and Lüscher, A. **2000**. Evidence that P deficiency induces N feedback regulation of symbiotic N₂ fixation in white clover (*Trifolium repens* L.). *Journal of Experimental Botany* 51: 1289-1297.
8. Aranjuelo, I., Arrese-Igor, C., & Molero, G. **2014**. Nodule performance within a changing environmental context. *Journal of plant physiology*, 171(12), 1076-1090.
9. Behi, O., **2003**. Modélisation des systèmes complexes par composition en sous-ensembles : Application a la biodisponibilité du phosphore provenant de phosphates naturels. Thèse de doctorat, Montpellier II. 192p.
10. Belaid D., 2016. Le semis direct, une opportunité de développement. *Revue Agriculture*. Numéro spécial 1, 146- 151.
11. Boudanga, L., Farissi, M., Bouizgaren, A., & Ghoulam, C., **2015**. Growth and nodulation in faba bean-rhizobia symbiosis under different soil phosphorus levels: Acid phosphatase and phosphorus deficiency tolerance. *J. Mater. Environ. Sci*, 6, 997-1003.

12. Boudjenouia, A., Fleury, A., & Tacherift, A., **2008**. L'agriculture périurbaine à Sétif (Algérie): quel avenir face à la croissance urbaine?. *BASE*.
13. Corre-Hellou, G., Baranger, A., Bedoussac, L., Cassagne, N., Cannavacciuolo, M., Joëlle, J., ... & Piva, G. **2014**. Interactions entre facteurs biotiques et fonctionnement des associations végétales. *Innovations Agronomiques*, 40, 25-42.
14. Cubero, J. I., **1973**. Evolutionary trends in *Vicia faba* L. TAG. Theoretical and applied genetics. *Theoretische und angewandte Genetik*, 43(2), 59-65.
15. Devau N, Le Cadre E, Hinsinger P, Gérard F. **2010**. A mechanistic model for understanding root-induced chemical changes controlling phosphorus availability. *Ann Bot.* 105:1183–1197.
16. Djili K., Daoud Y., Ayache N., 1999. Analyse de la distribution verticale et spatiale du calcaire dans les sols de l'Algérie Septentrionale. *Etude et gestion des sols* 6.3.201-213.
17. FAO **2017**. La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture. *World Resources Report*. 60, 138.
18. FAO. STAT, **2009**, <https://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>.
19. FAO., **2015**. Coping with climatic changes. The roles of genetic resources for food and agriculture.
20. Fennell, D. E., & Gossett, J. M. **1998**. Modeling the production of and competition for hydrogen in a dechlorinating culture. *Environmental Science & Technology*, 32(16), 2450-2460.
21. Gaudichon, C. C., Bigard, X., Chardigny, J. M., Legrand, P. P., Gerber, M., Mas, E., ... & Ménard, C., **2016**. Actualisation des repères du PNNS: élaboration des références nutritionnelles (Doctoral dissertation, Anses).
22. Giroux M., Cantin J., Rivest R., Tremblay G. **2002**. L'évolution des teneurs en phosphore dans les sols selon leur fertilité, leur richesse en phosphore et les types de sol. Colloque sur le phosphore, une gestion éclairée. *Ordre des Agronomes du Québec*, 19 pages.
23. Guinet, M., **2019**. Quantification des flux d'azote induits par les cultures de légumineuses et étude de leurs déterminants: comparaison de 10 espèces de légumineuses à graines (Doctoral dissertation, Université Bourgogne Franche-Comté).

24. Gunawaredena S.F.B.N., Danso S.K.A., Zapata F., **1992**. Phosphorus requirement and nitrogen accumulation three mungbean (*Vigna radiata* (L) Welzek) cultivars. *Plant soil* 147, 267-274.
25. Hernandez G., Ramirez M., Valde s-Lopez O., et al., **2007**. Phosphorus stress in common bean : root transcript and metabolic responses. *Plant Physiol.* 144, 752-767.
26. Hickman, G., & Canevari, M. **2012**. Fava Beans. California, University of California, Small Farm Center.
27. Hinsinger P, Plassard C, Tang CX, Jaillard B. **2003**. Origins of root-mediated pH changes in the rhizosphere and their responses to environmental constraints: A review. *Plant Soil.* 248:43–59.
28. Hinsinger P., Brauman A., Devau N., Gérard F., Jourdan C., Laclau J-P., Le Cadre E., Jaillard B. **2011**. Acquisition of phosphorus and other poorly mobile nutrients by roots. Where do plant nutrition models fail? *Plant Soil.* 348:203-218.
29. **Houassine D, Latati M, Rebouh YN, Gerard F., 2019**. Phosphorus acquisition processes in the field: study of faba bean cultivated on calcareous soils in Algeria. *Archive of Agronomy and Soil Science* 65. <https://doi.org/10.1080/03650340.2019.1605166>.
30. Jensen E.S., Peoples M.B., Boddey R.M., Gresshoff P.M., Hauggaard-Nielsen H., Alves B.J., Morrison M.J. **2012**. Legumes for mitigation of climate change and the provision of feedstock for biofuels and biorefineries. A review. *Agron Sustain Dev.* 32: 329-364.
31. Journet, E. P., Carreau, V., Gouzy, J., Thoquet, P., Rosenberg, C., Barker, D., ... & Gamas, P., **2001**. Génomique de la légumineuse modèle *Medicago truncatula*: état des lieux et perspectives. *Oléagineux, Corps gras, Lipides*, 8(5), 478-484.
32. Kherif, Omar, Mounir Seghouani, Bahia Zemmouri, Abderrahim Bouhenache, Mohamed I. Keskes, Rebouh Yacer-Nazih, Walid Ouaret, and **Mourad Latati**. 2021. "Understanding the Response of Wheat-Chickpea Intercropping to Nitrogen Fertilization Using Agro-Ecological Competitive Indices under Contrasting Pedoclimatic Conditions" *Agronomy* 11, no. 6: 1225. <https://doi.org/10.3390/agronomy11061225>

33. Kherif O., Seghouani M., Plasa D., Justes E., Zemmouri B., Dokukin P., **Latati M.** 2022. The first calibration and evaluation of the STICS soil-crop model on chickpea-based intercropping system under Mediterranean conditions. *European Journal of Agronomy*, 133 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126449>
34. Ladizinsky, G., **1975**. On the origin of the broad bean, *Vicia faba* L.
35. **Latati, M.**, Pansu, M., Drevon, J.J., Ounane, S.M., **2013**. Advantage of intercropping maize (*Zea mays* L.) and common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) on yield and nitrogen uptake in Northeast *Algeria*. *Int. J. Res. App. Sci.* 01, 1–7.
36. Latati Mourad, Blavet Didier, Alkama Nora, Laoufi H, Drevon Jean-Jacques, Gérard Férédéric, Pansu Marc, Ounane Sidi Mohamed., **2014**. The intercropping cowpea-maize improves soil phosphorus availability and maize yields in an alkaline soil. *Plant Soil* 385:181–191.
37. Latati M, Bargaz A, Belarbi B, Lazali M, Benlahrech S, Tellaha S, Kaci G, Drevon JJ, Ounane SM. **2016**. The intercropping common bean with maize improves the rhizobial efficiency, resource use and grain yield under low phosphorus availability. *Eur J Agron.* 72:80–90.
38. **M. Latat**, A. Aouiche, S. Tellah, A. Laribi, S. Benlahrech, G.Kaci, SM Ounan. **2017**. Intercropping maize and common bean enhances microbial carbon and nitrogen availability in low phosphorus soil under Mediterranean conditions. *European Journal of Soil Biology*, 80 : 8-19.
39. **Latati, M.**; Dokukin, P.; Aouiche, A.; Rebouh, N.Y.; Takouachet, R.; Hafnaoui, E.; Hamdani, F.Z.; Bacha, F.; Ounane, S.M. **2019**. Species Interactions Improve Above-Ground Biomass and Land Use Efficiency in Intercropped Wheat and Chickpea under Low Soil Inputs. *Agronomy* 2019, 9, 765.
40. **Latati, M.**, **2020**. Simulation of the Daily Exchange of Carbon and Nitrogen between Micro-organisms, Plant and Symbionts of Intercropped Legume with Cereal in Mediterranean Agro Ecosystem. In: *Microbial Mitigation of Stress Response of Food Legumes. CRC Press*, pp. 3–11. <https://doi.org/10.1201/9781003028413>.
41. Lazali M, Brahim S, Merabet C, Latati M, Benadis C, Maougal RT, Blavet D, Drevon JJ, Ounane SM. **2016**. Nodular diagnosis of contrasting recombinant

- inbred lines of *Phaseolus vulgaris* in multi-local field tests under Mediterranean climate. *Eur J Soil Biol.* 73:100–107.
42. Li L., Li S.M., Sun J.H., Zhou L.L., Bao X.G., Zhang H.G., 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- 11196.
 43. Maatougi, M.E. **1996**. Situation de la culture des fèves en Algérie et Perspectives de relance .*Céréaliculture*. N°.29 :6-18.
 44. MADR, **2000**. Investir en agriculture. Edts MADR, pp : 164.
 45. Maxted, N., Callimassia, M. A., & Bennett, M. D., **1991**. Cytotaxonomic studies of eastern Mediterranean *Vicia* species (Leguminosae). *Plant Systematics and Evolution*, 177, 221-234.
 46. Mbarek, K. B., Boujelben, A., Hannachi, C., & Boubaker, M. **2009**. Criblage et performances agronomiques de 45 géotypes de pois chiche (*Cicer arietinum* L.) soumis à un régime hydrique limité. *BASE*.
 47. Mealkhessuo Z., **2007**. Étude de la nuisibilité directe des adventices sur la culture de pois-chiche d’hiver (*cicer arietinum* L.) variété ILC 3279, cas *Sinapis arvensis*. Université El Hadj Lakhdar- Batna. Faculté des sciences ; Département d’Agronomie. Mémoire de Magister en sciences agronomiques.
 48. **Messaoudi H**, Gérard F, Dokukin P, Djamai H, Rebouh Y, **Latati M. 2020**. Effects of intercropping on field-scale phosphorus acquisition processes in a calcareous soil. *Plant and soil*. 449: 331-341. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04491-7>
 49. Muratova, V. S., **1931**. *Common Beans:(Vicia Faba L.)*.
 50. Mylona P., Pawlowski., Bisseling T., **1995**. Symbiotic nitrogen fixation. *Plant cel.* 7, 869-889.
 51. Nemecek T., von Richthofen J. S., Dubois G., Casta P., Charles R., Pahl, H. **2008**. Environmental impacts of introducing grain legumes into European crop rotations. *Eur j of agron.* 28: 380- 393.
 52. Neuman G., Romheld V., **1999**. Root excretion of carboxylic acids and proton in phosphorus deficient plants. *Plant soil* 211, 121-130.
 53. Rémond, D. and Walrand, S., **2017**. Les graines de légumineuses: Caractéristiques nutritionnelles et effets sur la santé. *Innovations Agronomiques*, INRA, 60 p.

54. Remond, D., & Walrand, S., **2017**. Les graines de légumineuses: caractéristiques nutritionnelles et effets sur la santé. *Innovations Agronomiques*, 60, np.
55. Reta Sanchez D.G., Santos Serrato Corona J., Viramontes R.F., Cueto Wong J.A., Padilla S.B., César J.S. **2008**. Cultivos alternativos con potencial de uso forrajero en la comarca lagunera, Primera, Mexico, pp. 41.
56. Richardson AE, Lynch JP, Ryan PR, Delhaize E, Smith FA, Smith SE, Harvey PR, Ryan MH, Veneklaas EJ, Lambers H, et al. **2011**. Plant and microbial strategies to improve the phosphorus efficiency of agriculture. *Plant Soil* 349:121–156.
57. Schneider, A., & Huyghe, C. **2015**. Les légumineuses pour des systèmes agricoles et alimentaires durables (p. 512). éditions Quae.
58. Schubert, E. ; Schubert E. and Mengel K. **1990**. Effect of low pH of the root medium on proton release, growth, and nutrient uptake of field beans (*Vicia faba*). In M. L. van Beusichem (Ed.), *Plant nutrition – physiology and applications*, 443 – 448.
59. Shen AL, Li XY, Kanamori T, Arao T. **2003**. Effect of long-term application of compost on some chemical properties of wheat rhizosphere and non-rhizosphere soils. *Pedosphere* 6:355–363.
60. Solaiman Z, Marschner P, Wang DM, Rengel Z. **2007**. Growth, P uptake and rhizosphere properties of wheat and canola genotypes in an alkaline soil with low P availability. *Biol Fert Soils*. 44:143–153.
61. Tabet R., Zaibet A., **2022**. Opportunités des Légumineuses pour une meilleure production des cultures. Université frères mentouri, constantine 1. Mémoire de Master en sciences agronomiques.
62. Vance C.P., Graham P.H., Allan D.L., **2003**. Biological nitrogen fixation : phosphorus- a critical futur need ? In : Pedrosa Fo, ed. *Nitrogen fixation : from molecules to crop productivity*. Nethrelands : Kluwer Academic publishers 509 -514.
63. Willey R., **1979**. Intercropping: its importance and research needs. 1. Competition and yield advantages. *Field Crop Abstr.* 32:1-10.
64. Wojciechowski, M. F., Lavin, M., & Sanderson, M. J. **2004**. A phylogeny of legumes (Leguminosae) based on analysis of the plastid matK gene resolves many well-supported subclades within the family. *American journal of*

botany, 91(11), 1846-1862.

65. Zaghouane O., **1997**. La situation et les perspectives de développement des légumineuses.
66. Zhang M.K., He Z.L., Calvert D.V., Stoffeua P.J., Yang X.E, Li Y.C. 2003. Phosphorus and heavy metal attachment and release in sandy soil aggregate fractions. *Soil Sci Soc Am J.* 67: 1158- 1167.