

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE**

المدرسة الوطنية العليا للفلاحة الحراش - الجزائر

ÉCOLE NATIONALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE EL HARRACH-ALGER

Thèse

**En vue de l'obtention du diplôme de Doctorat 3^{ème} cycle en sciences
agronomiques**

Option: Production et Amélioration végétales

Thème

**Effet de l'association et de la rotation blé dur (*Triticum durum* Desf.) /
Féverole (*Vicia faba* L.) sur les cycles biogéochimique du carbone, de l'azote
et du phosphore.**

Présentée par : M^r KACI Ghiles

Membres de jury

Président:	M ^{me} LAOUAR M.	Maître de Conférences /A (ENSA).
Directeur de thèse:	M ^r OUNANE S.M.	Professeur (ENSA).
Examineurs :	M ^r MEFTI M.	Maître de Conférences /A (ENSA).
	M ^{me} ALKAMA N.	Maître de Conférences /A (UMMTO).

Année universitaire : 2017/2018

Remerciements

Cette thèse en co-encadrement a été développée au sein de l'Unité Mixte de Recherche UMR Eco&Sols « Ecologie fonctionnelle & biogéochimie des sols & des agro-écosystèmes » appartenant à l'IRD-INRA-CIRAD de Montpellier, et du laboratoire d'amélioration intégrative des productions végétales de l'Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie.

Les travaux de cette thèse ont été financés par le projet de collaboration algéro-français Profas B+ ainsi que le projet Fabatropimed « Services écologiques des légumineuses pour les cycles biochimiques de l'azote et du phosphore et la séquestration du carbone dans les systèmes de culture céréalières en Afrique et dans le bassin Méditerranéen » et du projet Tassili. A toutes ces instances nationales et internationales, je leur exprime mes plus vifs remerciements.

Je tiens à adresser en premier lieu mes plus sincères remerciements aux personnes qui m'ont encadré durant ces cinq années de thèse :

- Monsieur Ounane Sidi Mohamed Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie, qui m'a fait l'honneur de diriger mes travaux de recherche. Ses conseils et ses orientations m'ont été fort utiles. Merci, Monsieur, d'avoir bien conservé à ce travail une cohérence depuis mon master jusqu'à la fin de ma thèse, en me laissant de nombreux degrés de liberté, et c'est appréciable!

- Monsieur Marc Pansu Directeur de Recherche à l'IRD-Montpellier qui, sans lui, cette collaboration avec l'UMR Eco&sol n'aurait jamais vu le jour. J'ai pu apprécier non seulement sa dimension académique, mais aussi sa non moins importante dimension humaine. J'en profite pour lui exprimer ici ma plus profonde gratitude.

- Monsieur Didier Blavet attaché de Recherche à l'IRD-Montpellier pour la confiance qu'il m'a accordée, pour le soutien et les encouragements continus depuis mon arrivée et pour l'opportunité d'effectuer ce travail sous sa direction et au sein de son équipe. Si je dois garder de ces cinq années de doctorat le souvenir d'un travail agréable et enrichissant, c'est en grande partie grâce à vous. Du fond du cœur, merci infiniment!

- Monsieur Jean-Jacques Drevon Directeur de Recherche à l'INRA-Montpellier qui a bien voulu accepté de m'intégrer au sein de son équipe de recherche et qui m'a permis d'acquérir beaucoup d'expériences et de savoir.

- Je tiens à remercier Dr. Laouar Meriem d'avoir accepté de présider mon jury.

- Mes remerciements vont aussi à Dr. Mefti Mohamed et Alkama Nora pour avoir bien voulu faire parti de mon jury et d'examiner mes travaux de recherche.

Un grand merci également aux membres de l'UMR Eco&Sols pour leur sympathie et leur aide. Je remercie messieurs Philippe Deleporte, Philippe Benezech et Frédéric Gérard qui étaient là tout le temps pour des discussions fructueuses et pour leur soutien moral. Je remercie encore Madame Agnès Martin, Jean Delarivière et Jean Michel Souquet pour leur aide dans la préparation et les analyses des échantillons. Je remercie mes collègues et amis thésards: Bouchra, Samia, Houda, Odile... pour leur sympathie. Je n'oublie pas tous les autres car la liste ne s'aurait être exhaustive.

Merci pour tous mes amis et collègues particulièrement ; Zaki, Bilal, Amine, Oussama, Mounir, Zaki, Saad, Tchive, Sabri, Djef et Menad.

Enfin, je souhaite remercier les familles Kaci et Mokrab pour leur soutien constant. Cette thèse, est l'aboutissement de longues années d'études, je la dois beaucoup à mes parents pour leur soutien indéfectible, ils ont toujours su me redonner confiance afin de mener à bon port cette thèse. A mon frère Sofiane, je ne saurais te remercier car tu as endossé tous les rôles pour me soutenir, tu as été un frère exceptionnel, un père et aussi un ami, un GRAND MERCI. A ma sœur Lyfia pour ses conseils et son soutien, tu es la meilleure sœur au monde.

Je tiens aussi à remercier une personne qui pendant de longues années est toujours restée à mes côtés, cette cher personne m'a toujours apportée lumière dans les moments les plus sombres de ma vie, un grand merci à toi ma Sam.

... Après avoir présenté mes chaleureux remerciements à toutes ces personnes, il est l'heure de rendre hommage aux personnes chers qui sont parti dans l'au delà, je dédie ce travail à la mémoire de mes chers grands parents, que Dieu les accueille dans son vaste paradis.

Liste des abréviations.

°c : Degré celsius.

ADN : acide désoxyribonucléique.

ADP : Adénosine diphosphate.

Anova : Analyse de la variance.

ARN : Acide ribonucléique.

ATP : Adénosine triphosphate.

BM : Biomasse microbienne.

C : Carbone.

CHN : Le Dry Combustion Elementary.

CIT : Carbone inorganique total .

cmole : Centimole.

Cn : Carbone nodulaire.

CO₂ : Dioxyde de carbone.

COT : Carbone organique total.

CT : CARBONE total.

EUP : Efficacité d'utilisation du Phosphore.

EURS : Efficacité d'utilisation de la symbiose rhizobienne.

g : Gramme.

Gt : Milliards de tonnes métriques.

H : Hydrogène.

H₂O : Eau.

ha : Hectare.

INRA : Institut National de la Recherche Agronomique.

Kg : Kilogramme.

l : Litre.

m : Mètre

Mg : Milligramme.

MO : Matière organique.

mol : Mole.

N : Azote.

N₂ : Azote moléculaire.

N₂O : Protoxyde d'azote.

NDW : Biomasse nodulaire sèche.

NH₃ : Ammoniac.

NH^{4+} : Ammonium.

Nn : Azote nodulaire.

NN : Nombre de nodules.

NO : Monoxyde d'azote.

NO^{3-} : Nitrate.

P : Phosphore.

p : Propabilité.

pH : potentiel hydrogène.

q : Quintal.

SAU : Surface agricole utile.

SDW : BIOMASSE aérienne sèche.

Liste des figures.

Figure 1 : Le cycle du carbone (DOE, 2008).

Figure 2 : Cycle de l'azote au sein d'une culture avec un focus sur la dynamique de l'azote dans une culture de légumineuses (fixation symbiotique et matière organique) et sur les fuites d'azote réactif vers l'environnement : atmosphère (NH_3 , N_2O , NO , N_2) et eaux (NO_3^- , DON) (Cellier et al. 2015).

Figure 3 : Cycle biogéochimique de P dans les parcelles cultivées (Source: adapté de Morel, 2002).

Figure 4 : Effet du pH de la solution du sol sur les formes ioniques de P en solution (Barber 1995).

Figure 5 : Diagramme ombrothermique de la région d'étude depuis Octobre 2013 jusqu'à Décembre 2015. Où S = Semi, F = Pleine Floraison et H = Récolte.

Figure 6 : Dispositif expérimental mis en place depuis 2013 (INRA Mauguio).

Figure 7 : Cartographie du site expérimental (A) et caractéristiques chimiques (CaCO_3 , N et P) effectuées au spectro NIRS(A, B et C).

Figure 8 : Variation du poids sec des nodules (A) et du nombre de nodules (B) chez la féverole en culture pure et en association au cours de trois campagnes.

Figure 9 : Poids sec des nodules en fonction du nombre de nodules par plante pour les féveroles en monoculture (points blancs) ou en association (points noirs) pour les années 2014 (A) et 2015 (B). Les équations sur les graphiques sont les régressions pour les cultures pures (texte gris clair) et les cultures en association (texte gris foncé). Toutes les régressions ont été établies à partir de seize répétitions (seize plantes). Les astérisques *, ** et *** indiquent une signification à $p < 0,05$, $p < 0,01$ et $p < 0,001$, respectivement.

Figure 10 : Efficacité d'utilisation de la symbiose rhizobienne de la féverole sous monoculture avec rotation bisannuelle (points blancs) par rapport à la culture en association (points noirs) pour les années 2013 (A), 2014 (B) et 2015 (C). Les équations sur les graphiques sont les régressions pour les cultures pures (texte gris clair) et les cultures en association (texte gris foncé). Toutes les régressions ont été établies à partir de seize répétitions (seize plantes). Les astérisques *, ** et *** indiquent une signification à $p < 0,05$, $p < 0,01$ et $p < 0,001$, respectivement.

Figure 11 : Teneur en azote, de la partie aérienne du blé (A) et de la féverole (B), de la partie racinaire du blé (C) et de la féverole (D), des nodules (E), ainsi que la teneur en azote totale de la plante pour le blé (F) et pour la féverole (G). Moyennes et SE pour seize répétitions récoltées à 130 jours après le semis. Pour chaque année, les valeurs moyennes étiquetées avec les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes à $p < 0,05$. FP = Féverole pure, AF = Association féverole, BP = Blé pure et AB = Association blé.

Figure 12 : Indice de nutrition azotée (NNI) du blé dur (A) et de la féverole (B). Moyennes et SE pour seize répétitions récoltées à 130 jours après le semis. Pour chaque année, les valeurs moyennes

étiquetées avec les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes à $p < 0,05$. B.P = Blé pur, A.B = Association blé, F.P = Féverole pure et A.F = Association féverole.

Figure 13 : Teneur en azote total du sol pour l'association blé/féverole (A), blé pure (B), féverole pure (F) et jachère (J) durant les trois années de culture 2013, 2014 et 2015. Moyennes et SE pour douze répétitions récoltées à 130 jours après le semis. Pour chaque année, les valeurs moyennes étiquetées avec les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes à $p < 0,05$.

Figure 14 : Teneur en azote de la fraction microbienne pour l'association blé/féverole (A), blé pur (B.P), féverole pure (F.P) et jachère (J) durant les trois années de culture 2013, 2014 et 2015. Moyennes et SE pour douze répétitions récoltées à 130 jours après le semis. Pour chaque année, les valeurs moyennes étiquetées avec les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes à $p < 0,05$.

Figure 15 : Azote de la fraction microbienne en fonction de l'azote nodulaire pour les féveroles en monoculture (points blancs) ou en association (points noirs). Les équations sur les graphiques sont les régressions pour les cultures pures (texte gris clair) et les cultures en association (texte gris foncé). Toutes les régressions ont été établies à partir de seize répétitions (seize plantes). Les astérisques *, ** et *** indiquent une signification à $p < 0,05$, $p < 0,01$ et $p < 0,001$, respectivement.

Figure 16 : Diagramme représentant une chambre de volume v (m^3) et de surface S (m^2) reposant sur le sol, avec un taux d'émission de CO_2 f_c ($mol\ m^{-2}\ s^{-1}$) et un taux de flux d'évaporation d'eau f_w ($mol\ m^{-2}\ s^{-1}$) (Source : Manuel d'utilisation Li-core LI-8100A).

Figure 17 : biomasse sèche aérienne du blé (A) et de la féverole (B), de la partie racinaire du blé (C) et de la féverole (D), ainsi que la biomasse sèche totale de la plante pour le blé (F) et pour la féverole (G). Moyennes et SE pour seize répétitions récoltées à 130 jours après le semis. Pour chaque année, les valeurs moyennes étiquetées avec les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes à $p < 0,05$. FP = Féverole pure, AF = Association féverole, BP = Blé pure et AB = Association blé.

Figure 18 : Rendement en grain du blé (A) et de la féverole (B), teneurs en protéines du blé (C) et de la féverole (D). Moyennes et SE pour seize répétitions récoltées à 130 jours après le semis. Pour chaque année, les valeurs moyennes étiquetées avec les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes à $p < 0,05$. FP = Féverole pure, AF = Association féverole, BP = Blé pure et AB = Association blé.

Figure 19 : Teneur en carbone, de la partie aérienne du blé (A) et de la féverole (B), de la partie racinaire du blé (C) et de la féverole (D), des nodules (E), ainsi que la teneur en carbone totale de la plante pour le blé (F) et pour la féverole (G). Moyennes et SE pour seize répétitions récoltées à 130 jours après le semis. Pour chaque année, les valeurs moyennes étiquetées avec les mêmes lettres ne

sont pas significativement différentes à $p < 0,05$. FP = Féverole pure, AF = Association féverole, BP = Blé pure et AB = Association blé.

Figure 20 : Teneur en carbone total du sol pour l'association blé/féverole (A), blé pure (B), féverole pure (F) et jachère (J) durant les trois années de culture 2013, 2014 et 2015. Moyens et SE pour douze répétitions récoltées à 130 jours après le semis. Pour chaque année, les valeurs moyennes étiquetées avec les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes à $p < 0,05$.

Figure 21 : Teneur en carbone de la fraction microbienne pour l'association blé/féverole (A), Blé pure (B.P), féverole pure (F.P) et jachère (J) durant les trois années de culture 2013, 2014 et 2015. Moyennes et SE pour douze répétitions récoltées à 130 jours après le semis. Pour chaque année, les valeurs moyennes étiquetées avec les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes à $p < 0,05$.

Figure 22 : Carbone de la fraction microbienne en fonction du carbone nodulaire pour les féveroles en monoculture (points blancs) ou en association (points noirs). Les équations sur les graphiques sont les régressions pour les cultures pures (texte gris clair) et les cultures en association (texte gris foncé). Toutes les régressions ont été établies à partir de seize répétitions (seize plantes). Les astérisques *, ** et *** indiquent une signification à $p < 0,05$, $p < 0,01$ et $p < 0,001$, respectivement.

Figure 23 : Flux de C-co₂ émis par le sol dans les différents systèmes de culture et au cours des différents stades végétatifs de la plante lors de la saison 2013 (A), 2014 (B) et 2015 (C). Moyennes et SE pour seize répétitions mesurées à chaque stade végétatif de la plante.

Figure 24 : Flux de CO₂ émis par le sol en fonction de la température du sol pour les quatre systèmes de culture au cours des années 2013 (A), 2014 (B) et 2015 (C). Toutes les régressions ont été établies à partir de quarante-huit répétitions. Les astérisques *, ** et *** indiquent une signification à $p < 0,05$, $p < 0,01$ et $p < 0,001$, respectivement.

Figure 25 : Teneur en phosphore, de la partie aérienne du blé (A) et de la féverole (B), de la partie racinaire du blé (C) et de la féverole (D), des nodules (E), ainsi que la teneur en P totale de la plante pour le blé (F) et pour la féverole (G). Moyennes et SE pour seize répétitions récoltées à 130 jours après le semis. Pour chaque année, les valeurs moyennes étiquetées avec les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes à $p < 0,05$. FP = Féverole pure, AF = Association féverole, BP = Blé pure et AB = Association blé.

Figure 26 : Efficacité d'utilisation du phosphore (EUP) du blé dur (A) et de la féverole (B). Moyennes et SE pour seize répétitions récoltées à 130 jours après le semis. Pour chaque année, les valeurs moyennes étiquetées avec les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes à $p < 0,05$. B.P = Blé pure, A.B = Association blé, F.P = Féverole pure et A.F = Association féverole.

Figure 27 : Teneur en Olsen-P total (A) et Olsen-P assimilable (B) du sol au cours des deux saisons de culture 2014 et 2015. Moyennes et SE pour douze répétitions récoltées à 130 jours après le

semis. Pour chaque année, les valeurs moyennes étiquetées avec les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes à $p < 0,05$.

Liste des tableaux.

Tableau 1 : Composition comparée des graines de légumineuses protéagineuses et du grain de blé (% de la matière sèche, sauf pour acides aminés exprimés en g/16g N) (Feillet 2000).

Tableau 2 : Superficie, production et rendement des principales légumineuses par Wilaya en Algérie (MADRP, Série B 2016).

Tableau 3 : Caractéristique physico-chimique du sol.

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : Recherche bibliographique	7
I. Généralités sur le Blé dur.....	7
I.1. Description générale.....	7
I.2. Importance de la culture du blé.....	7
I.3. Classification botanique du blé.....	8
II. Généralité sur la féverole.....	9
II.1. Importance des légumineuses.....	9
II.2. Situation des légumineuses en Algérie.....	10
II.3. Classification botanique de la féverole.....	12
III. Effet de l'introduction d'une légumineuse dans un système de culture.....	12
III.1. Les rotations culturales.....	13
III.2. Les associations céréales-légumineuses.....	15
IV. Les cycles biogéochimiques carbone, azote et phosphore.....	20
IV.1. Le carbone.....	20
IV.2. L'azote.....	23
IV.3. Le phosphore.....	28
Références bibliographiques.....	39
Chapitre II : Méthodologie de recherche	55
I. Objectif de recherche.....	55
II. Stratégie de recherche.....	56
II.1. Analyse des interactions entre espèces/choix des ratios de densité.....	56
II.2. Le dispositif de type substitutif.....	57
II.3. Les dispositifs de type additif.....	57
II.4. Choix du dispositif.....	57
III. Protocole expérimental.....	58
III.1. Région et site d'étude.....	58
III.2. Choix des espèces et cultivars.....	59
III.3. Dispositif expérimental.....	61
III.4. Choix du stade phénologique d'échantillonnage.....	63
IV. Mesures sol et plante.....	63
IV.1. Mesure du C et N.....	63
IV.2. Efficacité d'utilisation de la symbiose rhizobienne (EURS).....	65
IV.3. Mesure du P disponible dans le sol.....	65
IV.4. Dosage du P végétal.....	66
IV.5. Mesure des teneurs en C et en N de la biomasse microbienne du sol.....	66
V. Analyses et traitements Statistique.....	67
Références bibliographiques.....	68
Chapitre III : Effet de l'association et de la rotation blé/féverole sur le cycle de l'azote	71
I. Introduction.....	71
II. Matériel et Méthodes.....	72
II.1. Site et dispositif expérimental.....	72
II.2. Échantillonnage des plantes et du sol rhizosphérique.....	72
II.3. Dosage de l'azote dans le sol et la plante.....	72
II.4. Dosage de l'azote microbien.....	72
II.5. Indice de nutrition azotée (NNI).....	73
II.6. Analyse statistique et calculs.....	73
III. Résultats.....	74
III.1. Variation de la nodulation sous l'effet de l'association et de la rotation.....	74
III.2. Efficacité d'utilisation de la symbiose rhizobienne (EURS).....	75

III.3. Teneur en azote dans la plante.....	76
III.4. Indice de nutrition azotée (NNI).....	79
III.5. Teneur en azote total du sol.....	79
III.6. Teneur en azote de la fraction microbienne du sol.....	80
III.7. Relation entre l'azote nodulaire et l'azote de la fraction microbienne.....	81
IV. Discussion.....	82
V. Conclusion.....	85
Références bibliographiques.....	86
Chapitre IV : Effet de l'association et de la rotation blé/féverole sur le cycle du carbone.....	89
I. Introduction.....	89
II. Matériel et Méthodes.....	91
II.1. Site et dispositif expérimental.....	91
II.2. Échantillonnage des plantes et du sol rhizosphérique.....	91
II.3. Dosage du carbone dans le sol et la plante.....	91
II.4. Dosage du carbone microbien.....	91
II.5. Quantification des émissions de CO ₂ du sol dans les différents systèmes de culture.....	92
II.6. Analyse statistique et calculs.....	93
III. Résultats:.....	94
III.1. Effet des systèmes de culture sur la croissance des plantes.....	94
III.2. Effet des systèmes de culture sur le rendement et la qualité du grains.....	96
III.3. Effet des systèmes de culture sur la teneur en carbone de la plante.....	98
III.4. Effet du système de culture sur la séquestration de carbone dans le sol.....	101
III.5. Effet des systèmes de culture sur les teneurs en carbone de la biomasse microbienne.....	101
III.6. Relation entre le carbone nodulaire et le carbone de la fraction microbienne.....	102
III.7. Evolution de la respiration du sol sous l'effet des deux systèmes de cultures.....	103
IV. Discussion.....	105
V. Conclusion.....	108
Références bibliographiques.....	109
Chapitre V : Effet de l'association et de la rotation blé/féverole sur le cycle du phosphore.....	112
I. Introduction.....	112
II. Matériel et Méthodes.....	113
II.1. Site et dispositif expérimental.....	113
II.2. Échantillonnage des plantes et du sol rhizosphérique.....	113
II.3. Dosage du phosphore dans la plante.....	113
II.4. Dosage du phosphore dans le sol.....	114
II.5. Efficacité d'utilisation du Phosphore.....	114
II.6. Analyse statistique.....	114
III. Résultats.....	114
III.1. Teneur en Phosphore de la plante.....	114
III.2. Efficacité d'utilisation du Phosphore (EUP).....	117
III.3. Olsen-P Total et assimilable du sol.....	117
IV. Discussion.....	118
V. Conclusion.....	120
Références bibliographiques.....	121
Conclusion générale et perspectives.....	124
Annexes.....	126

Introduction :

L'agriculture moderne, qui produit des rendements élevés grâce à l'utilisation intensive d'intrants chimiques et d'énergie non renouvelable, est actuellement remise en question. Le passé récent a révélé à quel point ce modèle peut être coûteux en termes de santé publique et d'intégrité environnementale (Altieri 2000, Tilman et al. 2002). Les dernières recherches soulignent l'importance de concevoir des systèmes de cultures utilisant les principes écologiques et les services écosystémiques pour consolider la durabilité des agroécosystèmes (Clergue et al. 2005, Moonen et Bàrberi 2008, Wezel et al. 2014). Cette approche connue sous le nom « d'agroécologie » utilise un large éventail de pratiques pour améliorer le fonctionnement des systèmes de culture, y compris l'association de cultures, la rotation des cultures, la couverture végétale, l'engrais vert, le travail du sol minimum et l'agroforesterie (Wezel et al. 2014).

Jusqu'à présent, de nombreux ouvrages ont étudié la pratique répandue de l'association céréales / légumineuses. Partant du constat que dans les écosystèmes, les légumineuses se trouvent naturellement parmi les graminées, de nombreux auteurs les considèrent comme des espèces clé dans la promotion de l'efficacité des écosystèmes (Altieri 1999, Malézieux et al. 2009, Vandermeer 1995, Vandermeer et al. 1998). Leur intérêt dans les systèmes de culture s'explique en grande partie par leur capacité de fixer l'azote atmosphérique, (Bedoussac et al. 2015; Hauggaard-Nielsen et al. 2008). Les légumineuses associées sont capables aussi de fournir un large éventail de services supplémentaires en phase de produire des rendements sensiblement supérieurs à ceux de la monoculture (Willey 1979a). Cet avantage a été mis en évidence par plusieurs auteurs. (Wezel et al. 2014 ; Latati et al. 2014 ; Tang et al. 2014 ; Amossé et al., 2014)

Amossé et al., 2014 ont trouvé que les légumineuses associées aux céréales pouvaient stocker entre 40 et 100 kg N / ha dans les parties aériennes des plantes. Une augmentation de 30% du rendement de la culture de maïs a été corrélée positivement avec l'accumulation de l'azote dans les tissus de *Medicago lupulina*, *Medicago sativa*, *Trifolium pratense* et *Trifolium repens* (Amossé et al. 2014, Bergkvist et al. 2011).

Après l'azote, le phosphore (P) est le deuxième facteur limitant de la croissance des plantes (Vance et al. 2000). Bien qu'abondant dans le sol, il se trouve principalement sous des formes insolubles, peu disponibles pour les cultures. Cette limitation est due essentiellement à la présence de calcaire et des pHs alcalins et acides qui complexent de phosphore assimilable sous forme de phosphate tricalcique insoluble dans la solution du sol (Schachtman et al. 1998).

Pour contourner ce problème, les cultures associées céréales / légumineuses ont été proposées pour

améliorer l'acquisition du phosphore. Cette association est capable d'améliorer l'efficacité de l'absorption du phosphore en épuisant des pools inorganiques spécifiques (Cu et al. 2005, Hinsinger et al. 2011a). De plus, La minéralisation de la matière organique contrôle la libération du P organique dans la solution du sol. Les microorganismes jouent un rôle important dans la minéralisation du P organique à travers des processus complexes qui sont encore très mal compris (Hinsinger et al. 2011a).

L'augmentation de la disponibilité du phosphore dans la solution du sol est expliquée par l'acidification de la rhizosphère des légumineuses (Betencourt et al. 2012 (Alkama et al. 2009, 2012 ; Bargaz et al. 2015a, Hinsinger 2001, Hinsinger et al. 2003, Latati et al. 2014).

Par ailleurs, et en plus des facilitations directes via la fixation symbiotiques de l'azote et la solubilisation du phosphore, un autre type de facilitation se produit également lorsque l'association céréales/légumineuses modifie l'environnement de la culture. En effet, l'association s'est révélée très utile pour la gestion des mauvaises herbes et des ravageurs (Amossé et al. 2013a, Corre-Hellou et al. 2011, Trenbath 1993, Valantin-Morison et al. 2014, Vandermeer 1992).

Aussi, des études récentes indiquent que les teneurs en carbone organique, du sol et de la biomasse microbienne sont plus élevées dans les cultures associées que dans la monoculture (Verma et al. 2014). Tang et al. (2014), ont signalé une augmentation significative des stocks de carbone dans la rhizosphère de légumineuses associées avec de faibles apports de matière organique dans le sol. Chapagain et Riseman (2014) ont montré que, comparativement à la monoculture, l'association orge/pois améliore la productivité des terres et le stockage du carbone dans le sol.

Cependant, peu d'étude ont été réalisé sur les interactions souterraines entre les racines intercalées et les micro-organismes du sol et très peu de données sont disponibles sur les processus de facilitation (Duchene et al. 2017). L'abondance, le rôle et la fonction des communautés microbiennes sont mal pris en compte dans la facilitation des plantes et constituent le chaînon manquant pour comprendre la nutrition minérale des plantes et leurs interactions avec l'environnement immédiat (Lemoneau et al. 2014, 2013).

Dans l'hypothèse où l'introduction d'une légumineuse dans un système de culture céréalière faciliterait l'acquisition de l'azote, du phosphore et la séquestration de carbone, notre présent travail portera sur la comparaison de l'association et de la rotation bisannuelle des céréales et des légumineuses dans les conditions méditerranéennes du sud de la France sur une période de trois ans et en utilisant comme matériel végétal la féverole (*Vicia faba* cv Diva) et le blé dur (*Triticum durum* cv. LA1823). L'objectif majeur étant de voir dans quelle mesure l'association blé-féverole peut être

plus bénéfique que la rotation bisannuelle pour la croissance du blé et quel serait son effet sur la nodulation, et sur l'efficacité de la symbiose rhizobienne (FAS) de la féverole. L'objectif secondaire c'est de comprendre dans quelle mesure l'introduction de la féverole dans un système de culture peut affecter la séquestration du carbone, la biodisponibilité du phosphore ainsi que l'activité microbienne du sol.

Références bibliographiques :

- Alkama N., Bolou B.I., Bolou E., Vailhe H., Roger L., Ounane S.M., Drevon J.J. 2009. Genotypic variability in P use efficiency for symbiotic nitrogen fixation is associated with variation of proton efflux in cowpea rhizosphere. *Soil Biol. Biochem.* 41:1814-1823.
- Altieri M.A. 1999. The ecological role of biodiversity in agroecosystems. *Agric. Ecosyst. Environ.* 74:19–31.
- Altieri M.A. 2000. Agroecology: principles and strategies for designing sustainable farming systems. *Agroecol. Innov.* 70:40–46.
- Amossé C., Jeuffroy M.H., Celette F., David C. 2013a. Relay-intercropped forage legumes help to control weeds in organic grain production. *Eur. J. Agron.* 49:158–167.
- Amossé C., Jeuffroy M.H., Mary B., David C. 2014. Contribution of relay intercropping with legume cover crops on nitrogen dynamics in organic grain systems. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 98:1–14.
- Bargaz A., Isaac, M.E., Jensen E.S., Carlsson G. 2015. Intercropping of faba bean with wheat under low water availability promotes faba bean nodulation and root growth in deeper soil layers. *Proc. Envi. Sci.* 29:111-112.
- Bedoussac L., Journet E. P., Hauggaard-Nielsen H., Naudin C., Corre-Hellou G., Jensen E.S., Prieur L., Justes E. 2015. Ecological principles underlying the increase of productivity achieved by cereal-grain legume intercrops in organic farming. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 35:911-935.
- Bergkvist G., Stenberg M., Wetterlind J., Båth B., Elfstrand S. 2011. Clover cover crops under-sown in winter wheat increase yield of subsequent spring barley-Effect of N dose and companion grass. *Field Crops Res.* 120:292–298.
- Betencourt E., Duputel M., Colomb B., Desclaux D., Hinsinger P., 2012. Intercropping promotes the ability of durum wheat and chickpea to increase rhizosphere phosphorus availability in low P soil. *Soil Biol. Biochem.* 46:21–33.
- Brussaard L., de Ruiter P.C., Brown G.G. 2007. Soil biodiversity for agricultural sustainability. *Agric. Ecosyst. Environ.* 121:233–244.
- Carof M. 2006. Fonctionnement de peuplements en semis direct associant du blé tendre d’hiver (*Triticum aestivum* L.) à différentes plantes de couverture en climat tempéré. INAPG (AgroParisTech).

- Chapagain T., Riseman A., 2014. Barley–pea intercropping: Effects on land productivity, carbon and nitrogen transformations. *Field Crops Res.* 166:18-25.
- Clergue B., Amiaud B., Pervanchon F., Lasserre-Joulin F., Plantureux S. 2005. Biodiversity: function and assessment in agricultural areas. A review. *Agron Sustain Dev.* 25:1–15.
- Corre-Hellou G., Dibet A., Hauggaard-Nielsen H., Crozat Y., Gooding M., Ambus P., Dahlmann C., von Fragstein P., Pristeri A., Monti M., Jensen E.S. 2011. The competitive ability of pea-barley intercrops against weeds and the interactions with crop productivity and soil N availability. *Field Crops Res.* 122:264–272.
- Cu S.T.T., Hutson J., Schuller K.A. 2005. Mixed culture of wheat (*Triticum aestivum* L.) with white lupin (*Lupinus albus* L.) improves the growth and phosphorus nutrition of the wheat. *Plant Soil.* 272:143–151.
- Duchene O., Vian J.F., Celette F. 2017. Intercropping with legume for agro-ecological cropping systems: Complementarity and facilitation processes and the importance of soil microorganisms. A review. *Agr Ecosyst Environ.* 240:148-161.
- Hauggaard-Nielsen H., Gooding M., Ambus P., Corre-Hellou G., Crozat Y., Dahlmann C., Dibet A., von Fragstein P., Pristeri A., Monti M., Jensen E.S. 2009. Pea-barley intercropping for efficient symbiotic N₂-fixation, soil N acquisition and use of other nutrients in European organic cropping systems. *Field Crops Res.* 113:64-71.
- Hinsinger P., Plassard C., Tang C., 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.
- Hinsinger P., Brauman A., Devau N., Gérard F., Jourdan C., Laclau J-P., Le Cadre E., Jaillard B. 2011a. Acquisition of phosphorus and other poorly mobile nutrients by roots. Where do plant nutrition models fail? *Plant Soil.* 348:203-218.
- Latati M., Blavet D., Alkama N., Laoufi H., Drevon J.J., Gérard F., Pansu M., Ounane S.M. 2014. The intercropping cowpea–maize improves soil phosphorus availability and maize yields in an alkaline soil. *Plant Soil.* 85:181–191.
- Lemanceau P., Maron P.A., Mazurier S., Mougel C., Philippot L., Pivato B., Plassart P., Ranjard L., Revellin C., Tardy V. 2014. Qu’attendre des recherches en microbiologie du sol? Fertilisation et environnement: Quelles pistes pour l’aide à la décision?.
- Malézieux E., Crozat Y., Dupraz C., Laurans M., Makowski D., Ozier-Lafontaine H., Rapidel B., de Tourdonnet S., Valantin-Morison M. 2009. Mixing plant species in cropping systems: concepts, tools and models. A review. *Agron Sustain Dev.* 29:43-62.

- Moonen A.C., Bàrberi P. 2008. Functional biodiversity: an agroecosystem approach. *Agric Ecosyst Environ.* 127:7–21.
- Schachtman D.P., Reid R.J., Ayling S.M. 1998. Phosphorus uptake by plants: from soil to cell. *Plant Physiol.* 116, 447–453.
- Tang X., Bernard L., Brauman A., Daufresne T., Deleporte P., Desclaux D., Souche S., Placella S.A., Hinsinger P. 2014. Increase in microbial biomass and phosphorus availability in the rhizosphere of intercropped cereal and legumes under field conditions. *Soil Biol Bioch.* 75: 86-93.
- Tilman D., Cassman K.G., Matson P.A., Naylor R., Polasky S. 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature.* 418:671–677.
- Trenbath B.R., 1993. Intercropping for the management of pests and diseases. *Field Crops Res. Intercropping-Bases Product.* 34:381-405.
- Valantin-Morison M., David C., Cadoux S., Lorin M., Amossé C., Basset A. 2014. Association d'une culture de rente et espèces compagnes permettant la fourniture de services écosystémiques. *Agron. Innov.* 40:50-58.
- Vance C.P., Graham P.H., Allan D.L. 2000. Biological Nitrogen Fixation: Phosphorus - A Critical Future Need?. In: *Nitrogen Fixation: From Molecules to Crop Productivity*, Pedrosa, F.O., Hungria M., Yates G., Newton W.E. (Eds.). *Current Plant Science and Biotechnology in Agriculture*. Springer, Netherlands, pp. 509–514.
- Vandermeer J., van Noordwijk M., Anderson J., Ong C., Perfecto I. 1998. Global change and multi-species agroecosystems: concepts and issues. *Agric Ecosyst Environ.* 67:1-22.
- Verma RK., Yadav A., Rahman L., Kalra A., Patra DD. 2014. Influence the status of soil chemical and biological properties by intercropping. *Int J Recycl Org Waste Agricult.* 3:46-52.
- Wezel A., Casagrande M., Celette F., Vian J.F., Ferrer A., Peigné J. 2014. Agroecological practices for sustainable agriculture. A review. *Agron Sustain Dev.* 34:1–20.
- Willey R. 1979a. Intercropping: its importance and research needs. 1. Competition and yield advantages. *Field Crop Abstr.* 32:1-10.

I. Généralités sur le Blé dur :

I.1. Description générale :

Le blé dur (*Triticum turgidum* ssp. *durum*) est une monocotylédone de la famille des Graminées, de la tribu des Triticées et du genre *Triticum*. D'après Bozzini (1988), il s'agit d'une graminée annuelle caractérisé par une hauteur moyenne et un limbe aplati, son inflorescence en épi se compose de fleurs parfaites. Son système racinaire est caractérisé par des racines séminales émient par la plantule au cours de la levée ; les racines adventives qui constituent le système racinaire permanent se forment dans un second temps à partir de la base du plateau de tallage. La tige du blé dur est de forme cylindrique, généralement creuse, et qui se subdivise en entrenœuds. Toutefois, et selon Clarke et al. (2002), il existerait certaines variétés de blé dur à tiges pleines. À la base de la tige principale, les bourgeons auxiliaires émettent les chaumes (talles) et se forment au niveau des nœuds. Cependant, en fonction des variétés, des conditions de croissance et de la densité de semis, le nombre de brins varie fortement ; Bozzini (1988), signale qu'en conditions normales la plante peut produire trois brins en plus de la tige principale, mais tous ne grènent pas forcément. La feuille du blé dur, est constituée d'une gaine entourant la tige, d'une partie terminale qui s'aligne avec les nervures parallèles et d'une extrémité pointue. Au niveau du point d'attache de la gaine se trouve une membrane mince et transparente (ligule) comportant deux petite oreillettes. Une inflorescence en forme d'épi ponctue la tige principale et chaque brin.

L'épi se distingue par la présence d'un rachis comportant des épillets, séparés par de courts entrenœuds (Bozzini 1988). Chaque épillets comporte deux glumes (bractées) composées de deux à cinq fleurs disposées sur deux rangs différents (distiques) sur une rachéole. Chaque fleur est constituée de trois étamines à anthères biloculaires et un pistil à deux styles à stigmates plumeux. Le caryopse défini comme le fruit issu d'une fleur est composé d'une seule graine, cette dernière contient un large endosperme et un embryon aplati localisé à l'apex de la graine et à proximité de la base de la fleur.

I.2. Importance de la culture du blé :

- Dans le monde :

Bozzini (1988), décrit la culture du blé comme étant une culture occupant une place très importante dans la production agricole mondiale et qui représente 35 % de la nourriture produite mondialement. L'alimentation de la population mondiale basé essentiellement sur des produits dérivés du blé rend sa culture la plus prônée des céréales. Selon FAO (2016), les prévisions concernant la production mondiale de toutes céréales confondues (blé et céréales secondaires) pour

l'année 2016/2017 serait de l'ordre de 2069 millions de tonnes, ce qui est considéré par l'agence mondiale comme étant un record absolu. La production mondiale de blé entre 1990 et 2016 a fait une progression remarquable estimée à 23,6 % (Glenn Lennox 2003). Toutefois, en terme de production de blé par pays, l'union européenne se positionne à la première place devant la Chine, l'Inde, la Russie, les USA, et le Canada, avec une production annuelle estimée en moyenne à 159,9 million de tonne entre 2014 et 2016 (FAO 2016).

De part ses facultés d'adaptation et de tolérance, le blé peut être cultivé dans des régions à faible pluviométrie et sans irrigation avec une pluviométrie de 500 mm par année, (Henry et al. 2000).

- Dans le bassin méditerranéen :

Dans les pays méditerranéens, la superficie totale allouée à la culture du blé avoisinerait les 20-30 millions d'hectares, soit 8 % de la superficie totale du monde. L'union européenne représentée majoritairement par l'Italie, l'Espagne et la Grèce se place en première position des pays producteurs de blé dur avec une production estimée à huit millions de tonnes métriques, suivis par le Canada, la Turquie et les USA avec 4.6, 4 et 3.5 million de tonnes métriques par années respectivement (CIC 2002).

Le plus grand marché d'importation du blé dur se situe dans la zone nord africaine représentée essentiellement par l'Algérie, le Maroc, la Tunisie et la Libye (Glenn Lennox 2003). De ce fait, la région méditerranéenne détient la moitié de la superficie mondiale de production de blé dur destinée essentiellement à la consommation humaine.

Par ailleurs, les régions, du Proche Orient et d'Afrique du Nord sont considérées comme le centre d'origine et de diversification du blé dur (Vavilov 1951).

I.3. Classification botanique du blé :

Le blé est une monocotylédone, appartenant au genre *Triticum*, tribu des *Triticeae*, famille des *Poaceae*. Selon le nombre chromosomiques, trois grands groupes de *Triticum* se dégagent :

- Le groupe des diploïdes (2×7 chromosomes) comprend *Triticum monococcum* (engrain) et *T. spontaneum*, qui représentent les formes les plus anciennement cultivées, et qui sont caractérisées par des épis grêles où les grains restent enveloppés par les glumelles ;

- Le groupe des tétraploïdes (4×7 chromosomes) comprend *T. dicoccoides* (amidonnier sauvage), *T. dicoccum* (amidonnier), *T. turgidum* et *T. durum* (blé dur), caractérisées par des épis denses destinés à la production de pâtes alimentaires du fait de la forte teneur en gluten contenue dans les grains ;

- Le groupe des hexaploïdes (6×7 chromosomes) comprend *T. vulgare*, ou *T.*

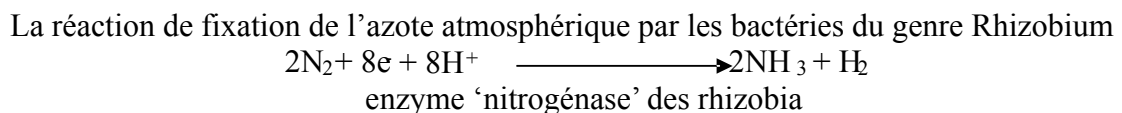
aestivum (blé tendre) et *T. spelta* (épeautre), caractérisées par des épis assez larges et servant à la production de pain.

II. Généralité sur la féverole :

II.1. Importance des légumineuses :

Selon AYKROYD et DOUGHTY (1964), environ 13 000 espèces réparties dans le monde représentent les légumineuses, mais, seul 12 000 espèces ont un intérêt agronomique.

Les légumineuses se distinguent par des propriétés biologiques leur conférant un atout majeur en agriculture durable,. Ce dernier représente 78 % de l'atmosphère, mais reste non accessible à la majorité des cultures. En effet, les légumineuses sont capables d'établir une symbiose avec les bactéries du sol et notamment les Rhizobia, pour fixer l'azote atmosphérique (Duchene et al. 2017).



Chaque espèce de légumineuses ou un groupe d'espèces apparentées sont nodulés par des Rhizobia spécifiques. Cependant, certaines légumineuses nécessitent une inoculation par des Rhizobia adaptés, tel est le cas du soja avec *Bradyrhizobium japonicum*, du lupin blanc avec *Rhizobium lupini* dans les sols à pH élevé, et de luzerne avec *Rhizobium meliloti* dans les sols à pH acide (Duc et al. 2010).

La fixation symbiotique de l'azote atmosphérique procure entre 40 et 90 % des besoins en azote d'une légumineuse, le complément est fourni par le sol (Ohyama 2017). Selon Voisin et al. (2002), un arrêt de la fixation symbiotique du pois est constaté lorsque la concentration en nitrate atteint 40 kg/ha dans l'horizon labouré.

En plus de leur aptitude à fixer l'azote atmosphérique, les légumineuses s'avèrent d'excellentes cultures en rotation voir même association d'une ou plusieurs espèces. Un effet précédent cultural positif est souvent observé dans les rotations incluant une légumineuse De plus, les légumineuses améliorent la biodisponibilité du phosphore dans le sol, en acidifiant le sol (Cong et al. 2015).

En outre, les légumineuses à graines ou fourragères sont caractérisées par une grande richesse en protéines et de bonne valeur nutritionnelle aussi bien pour l'alimentation humaine que animale. Les graines de protéagineux présentent des caractéristiques intéressantes au plan nutritionnel et santé quand elles sont consommées directement par l'homme (Feillet 2000).

Tableau 1. Composition comparée des graines de légumineuses protéagineuses et du grain de blé (% de la matière sèche, sauf pour acides aminés exprimés en g/16g N). (Feillet 2000)

Constituants/espèce	Amidon	Fibres	Lipides	Protéines	Lysine	Méthionine + Cystéine
Pois	50	15	2	22-25	7,1	2,4
Féverole	43	18	2	28-32	6,5	2,1
Lupin blanc	1	22	10	35-39	4,3	2
Soja	2	20	20	36-40	6,2	2,8
Blé	70	8-10	1-1.5	10-15	2,3	4

Le tableau 1 illustre la grande richesse en protéines des graines protéagineuses par rapport au blé. Cependant, on constate la grande capacité du pois et de la féverole à fournir également de l'énergie sous forme d'amidon. Ces caractéristiques nutritionnelles des légumineuses, apportent des éléments intéressants de valeur intrinsèque de ces graines et de leur complémentarité à l'égard des céréales (Feillet 2000).

II.2. Situation des légumineuses en Algérie :

Selon le rapport national sur l'état des ressources phytogénétiques pour l'alimentation et l'agriculture (2006), une nouvelle stratégie de développement économique agricole et de renouveau rural a été mise en place et ce dans le but de palier à la dépendance extérieure et assurer la sécurité alimentaire nationale. Cette stratégie s'oriente vers l'intensification écologique des cultures stratégiques, qui repose sur dix programmes spécifiques et prioritaires; ils concernent les productions végétales et le développement des légumes secs.

Les principales légumineuses cultivées en Algérie sont la fève/féverole ainsi que le pois chiche, ces deux cultures couvrent à elles seules l'équivalent de 79 % de la superficie totale allouée aux cultures de léguminees secs. Le tableau ci dessous montre la superficie, la production et le rendement des principales légumineuses à graines au cours de la campagne agricole 2016 (Ministère de l'Agriculture du Développement Rurale et de la Pêche).

Tableau 2. Superficie, production et rendement des principales légumineuses par Wilaya en Algérie (Source : MADRP Série B 2016).

WILAYA	Fèves-féveroles			Lentilles			Pois chiches			TOTAL		
	Superficie	Production	Rdt	Superficie	Production	Rdt	Sup.	Prod.	Rdt	Sup.	Prod.	Rdt
	ha	qx	qx/ha	ha	qx	qx/ha	ha	qx	qx/ha	ha	qx	qx/ha
1 ADRAR	0	0	0,0	73	460	6,3	0	0	0,0	73	460	6,3
2 CHLEF	6 255	70 600	11,3	500	7550	15,1	1 852	22 530	12,2	9 287	109 440	11,8
3 LAGHOUAT	0	0	0,0	0	0	0,0	0	0	0,0	0	0	0,0
4 O.E.BOUAGHI	0	0	0,0	228	685	3,0	24	121	5,0	252	806	3,2
5 BATNA	0	0	0,0	0	0	0,0	0	0	0,0	0	0	0,0
6 BEJAIA	580	9 958	17,2	0	0	0,0	31	401	12,9	635	10 589	16,7
7 BISKRA	0	0	0,0	0	0	0,0	0	0	0,0	0	0	0,0
8 BECHAR	0	0	0,0	0	0	0,0	0	0	0,0	0	0	0,0
9 BLIDA	0	0	0,0	0	0	0,0	20	178	8,9	20	178	8,9
10 BOUIRA	885	11 247	12,7	118	1353	11,5	435	4 962	11,4	1 446	17 634	12,2
11 TAMANRASSET	0	0	0,0	0	0	0,0	0	0	0,0	0	0	0,0
12 TEBESSA	0	0	0,0	0	0	0,0	0	0	0,0	0	0	0,0
13 TLEMCEM	4 570	43 680	9,6	13	200	15,4	5 350	73 000	13,6	14 185	154 830	10,9
14 TIARET	0	0	0,0	598	5740	9,6	200	1 600	8,0	798	7 340	9,2
15 TIZI-OUZOU	894	11 313	12,7	5	57	11,4	67	815	12,2	1 016	12 753	12,6
16 ALGER	0	0	0,0	0	0	0,0	0	0	0,0	0	0	0,0
17 DJELFA	0	0	0,0	0	0	0,0	0	0	0,0	0	0	0,0
18 JIJEL	248	3 035	12,2	0	0	0,0	103	1 124	10,9	363	4 271	11,8
19 SETIF	336	4 188	12,5	248	1715	6,9	53	550	10,4	747	7 552	10,1
20 SAIDA	79	1580	20,0	5	60	12,0	67	718	10,7	189	2 928	15,5
21 SIKKDA	4 490	43 996	9,8	5	50	10,0	1 200	15 960	13,3	5 750	60 560	10,5
22 S.B.ABBES	584	6 074	10,4	28	252	9,0	1 413	16 108	11,4	2 562	28 000	10,9
23 ANNABA	530	5 830	11,0	0	0	0,0	369	6 785	18,4	899	12 615	14,0
24 GUELMA	2 740	36 750	13,4	260	3 486	13,4	2 214	29 947	13,5	5 230	70 310	13,4
25 CONSTANTINE	1 058	18 110	17,1	900	8 770	9,7	405	4 110	10,1	2 673	34 370	12,9
26 MEDEA	1 179	9 816	8,3	160	1189	7,4	481	4 208	8,7	1 875	15 749	8,4
27 MOSTAGANEM	1 445	18 530	12,8	0	0	0,0	2 340	27 291	11,7	4 228	50 307	11,9
28 M'SILA	0	0	0,0	0	0	0,0	0	0	0,0	0	0	0,0
29 MASCARA	1 100	14 000	12,7	5	50	10,0	2 470	25 950	10,5	4 710	53 800	11,4
30 OUARGLA	0	0	0,0	0	0	0,0	0	0	0,0	0	0	0,0
31 ORAN	236	1 629	6,9	0	0	0,0	202	1 477	7,3	821	5 546	6,8
32 EL-BAYADH	0	0	0,0	0	0	0,0	0	0	0,0	0	0	0,0
33 ILLIZI	0	0	0,0	0	0	0,0	0	0	0,0	0	0	0,0
34 B.B.ARRERIDJ	26	172	6,6	109	946	8,7	64	276	4,3	199	1 394	7,0
35 BOUMERDES	800	12 400	15,5	0	0	0,0	197	3 054	15,5	1 005	15 550	15,5
36 EL-TARF	185	1 600	8,6	0	0	0,0	435	7 000	16,1	620	8 600	13,9
37 TINDOUF	0	0	0,0	0	0	0,0	0	0	0,0	0	0	0,0
38 TISSEMSILT	161	1 645	10,2	226	2249	10,0	104	1 048	10,1	511	5 122	10,0
39 EL-OUED	0	0	0,0	0	0	0,0	0	0	0,0	0	0	0,0
40 KHENCHELA	0	0	0,0	0	0	0,0	0	0	0,0	0	0	0,0
41 SOUK-AHRAS	2 400	24 000	10,0	300	3600	12,0	1 500	18 000	12,0	4 824	52 653	10,9
42 TIPAZA	268	5 810	21,7	37	535	14,5	256	3 330	13,0	603	10 172	16,9
43 MILA	315	3 864	12,3	1 670	23867	14,3	359	4 269	11,9	2 371	32 364	13,6
44 AIN-DEFLA	2 282	24 845	10,9	0	0	0,0	509	4 395	8,6	3 161	33 290	10,5
45 NAAMA	0	0	0,0	0	0	0,0	0	0	0,0	0	0	0,0
46 A.TEMOUCHENT	1 877	17 915	9,5	0	0	0,0	6 195	66 270	10,7	9 700	98 152	10,1
47 GHARDAIA	0	0	0,0	0	0	0,0	0	0	0,0	0	0	0,0
48 RELIZANE	2 145	21 275	9,9	55	370	6,7	405	4 325	10,7	4 240	40 995	9,7
TOTAL ALGERIE	37 668	423 862	11,3	5 543	63 184	11,4	29 320	349 802	11,9	84 993	958 330	11,3

Selon le tableau 2 la superficie totale consacrée aux légumineuses est de 84 993 ha soit environs 1 % de la SAU (Superficie Agricole Utile), la fève et la féverole occupent une place très importante avec une superficie de 37 668 ha soit environ 44 % de la superficie totale allouée aux cultures des légumineuses, avec une production moyenne annuelle de 423 862 q. Les zones de cultures de la fève et de la féverole se concentrent essentiellement dans les plaines côtières et les plaines intérieures, la wilaya de Chlef se positionne à la tête des régions les plus productrices de fève et féverole avec une superficie totale de 6 255 ha et une production de 70 600 q, suivis de Tlemcen, Skikda et Guelma avec une superficie de 4 570, 4 490 et 2 740 ha et une production de 43 680, 43 996 et 36 750 q respectivement.

II.3. Classification botanique de la féverole :

Selon Reta Sanchez et al. (2008), la féverole est une légumineuse (*Leguminosae*) appartenant au genre *Vicia* à $2n = 12$ chromosomes.

Cette espèce présente une assez grande variabilité morphologique (poids, forme, coloration du grain, hauteur des plantes).

D'après la grosseur du grain, on distingue classiquement 3 sous-espèces :

V. Faba minor, féverole à grains petits;

V. Faba equina, féverole à grains moyens (1 g au max.).

D'après 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*.

III. Effet de l'introduction d'une légumineuse dans un système de culture :

Historiquement, les agriculteurs ont observé que certaines cultures épuisées la terre en donnant des récoltes de plus en plus faibles. En effet, les agriculteurs ont remarqué une diminution régulière des récoltes pour les terres emblavées en blé plusieurs années consécutives.

De ce fait, ils avaient conclu que le sol avait besoin de repos à intervalles réguliers, d'où la naissance et la pratique de la jachère. En effet, des résultats plus ou moins fructueux commençaient à apparaître, puisque les rendements augmentaient après cette période sans cultures (Pousset et Bureau 2014).

Cependant, certains chercheurs ont commencé à mettre en doute la notion de repos des sols cultivés. Ils ont émis l'hypothèse que la jachère n'existe pas dans la nature en se basant sur le fait que les terres ne restent jamais sans couvert végétal naturellement afin de se reposer. Jean-Marie Roger avait coutume de dire : « le sol qui se repose [au sens du mauvais repos] s'appauvrit. Celui qui produit s'enrichit. » (Pousset et Bureau 2014).

Selon Pousset et Bureau (2014), la jachère travaillée pendant environs une année et sur laquelle est apporté le fumier, s'appauvrit, s'enrichit et se nettoie. Elle s'appauvrit, car le pool microbien est stimulé par les façons culturales qui aèrent la terre, la stimulation de ce pool induit une dégradation de la matière organique du sol libérant ainsi plusieurs nutriments essentiels au développement des cultures. Cependant, l'absence de végétation cultivée ou spontanée conduit à une perte partielle de ces nutriments par lessivage, et par évaporation. Le reste est recombinaé sous forme d'humus. Elle se nettoie si les façons culturales sont bien menées, car les racines et rhizomes des mauvaises herbes vivaces meurent s'il sont convenablement arrachés et exposés au soleil.

III.1. Les rotations culturales :

La révolution agricole de l'après-guerre a conduit, entre les décennies 1950 et 1980, à une intensification importante de l'agriculture, grâce au développement de la mécanisation et à un usage de plus en plus intensif d'intrants de synthèse (Ohyama 2017). Cette intensification, et la structuration concomitante des filières, ont favorisé une forte spécialisation des systèmes de production pratiqués, avec une séparation géographique entre production animale et végétale et des rotations de plus en plus courtes (Neugschwandtner et al. 2015). Cette évolution, basée sur le choix d'espèces cultivées assurant la meilleure rentabilité à court terme, a conduit à l'abandon d'espèces produisant certains services agronomiques et environnementaux telles que les légumineuses (Scott et al. 2010). De cette intensification émane des préoccupations environnementales (pollution des milieux, émissions de gaz à effet de serre, perte de biodiversité ...) et le développement de l'agriculture biologique, marquant ainsi les premiers signes de remise en cause de ce système de production agricole intensif qualifié par Allaire et Boyer (1995) d'agriculture du fordisme. La réintroduction des légumineuses dans les systèmes de culture devient ainsi primordiale dans le but de concevoir une agriculture plus durable et moins nocif à l'environnement. Des modes de

production tel que les rotations incluant des légumineuses limitant l'usage d'intrants et reposant sur une valorisation de la diversité et des régulations bioécologiques dans les agro-systèmes, que l'on peut regrouper sous le terme d'agro-écologie (Altieri 1992 ; Altieri et Nicholls 2012), peuvent répondre à ces objectifs.

Dans ce contexte, les légumineuses présentent plusieurs atouts : (i) les légumineuses constituent une source de protéines végétales de bonne valeur nutritionnelle, avec des protéines aux caractéristiques complémentaires de celles des céréales, (ii) la capacité à fixer l'azote de l'air en symbiose avec des bactéries du sol leur confère un fort potentiel d'insertion dans les systèmes de culture à bas niveaux d'intrants et à faible niveau d'émission de gaz à effet de serre. (iii) Enfin, dans les systèmes de culture actuels dominés par deux ou trois espèces majeures, les légumineuses jouent un rôle de cultures de diversification, permettant une rupture des cycles des bioagresseurs, le développement de populations d'auxiliaires de défense des cultures, une réduction des intrants pour les autres cultures de la succession, l'amélioration de leur efficacité, et l'accroissement de la qualité (Duchene et al. 2017).

La prise en compte des enjeux environnementaux a conduit la recherche occidentale à concevoir des systèmes de production plus durables, pour réduire leurs impacts négatifs sur les milieux, gérer la raréfaction de certaines ressources (eau, énergie fossile), et s'adapter aux changements climatiques. En ce sens, de nouvelles pratiques agricoles plus efficaces et respectueuses de l'environnement doivent être adoptées. Face à cet enjeu, les légumineuses ont un rôle important à jouer (Jensen et al. 1996a).

Par leur capacité à fixer l'azote atmosphérique, les légumineuses nécessitent peu ou pas de fertilisation azotée (Ohyama 2017). De ce fait, elles permettent de limiter les apports d'engrais azotés dans les systèmes de culture où elles sont introduites. De plus, la minéralisation de leurs résidus de culture permet de laisser un reliquat à la culture suivante (Oelbermann et al. 2015). Ainsi, les recommandations de réduction de dose azotée après pois peuvent être en moyenne de 20 à 60 kg N/ha pour un blé et de 30 à 60 kg N/ha pour un colza, pour un rendement équivalent ou supérieur (Carrouée et al. 2012). Cette réduction de la fertilisation azotée contribue à la réduction des émissions de gaz à effet de serre (Nemecek et al. 2008 ; Jensen et al. 2012) essentiellement le dioxyde de carbone (CO₂) émis lors de la production des engrais, et protoxyde d'azote (N₂O) émis lors de leur épandage. De plus, les cultures de légumineuses et la minéralisation de leurs résidus ont des niveaux d'émissions de N₂O similaires aux cultures non légumineuses non fertilisées (Jeuffroy et al. 2013 ; Rochette et Janzen 2005 ; Jensen et al. 2012).

La contribution des légumineuses à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et à la réduction de l'épuisement des énergies fossiles, peut donc s'avérer très importante (Carrouée et al. 2012).

D'autres services écosystémiques rendus par les légumineuses méritent d'être considérés, comme l'amélioration de la structure du sol, la diversification des rotations et la rupture des cycles de pathogènes telluriques ainsi que la réduction de la lixiviation des nitrates dans le cas de légumineuses pérennes à système racinaire profond (Jensen et al. 2012). Une légumineuse pérenne est exploitée essentiellement par fauche, comme la luzerne, favorise la biodiversité aviaire au niveau des territoires (Berthet et al. 2012).

Selon David et al. (2005), les légumineuses prennent une place stratégique dans l'agriculture biologique afin d'assurer l'équilibre du bilan azoté des exploitations, particulièrement dans les systèmes sans élevage. Cependant, et malgré les nombreux atouts que présentent les légumineuses, elles occupent une faible place dans les assolements et rotations (Scalise et al. 2015). La recherche de l'accroissement des productivités céréalières mondiales a détourné les agriculteurs de ces espèces, qui contrairement aux céréales (blé, maïs..) n'ont bénéficié que d'un investissement limité en matière de sélection variétale, et d'expérimentation (Scalise et al. 2015).

III.2. Les associations céréales-légumineuses :

Evans et Cameron (1998) révèle que l'intensification de l'agriculture par la sélection variétale, la mécanisation et l'utilisation des intrants chimiques a contribué dans certaines zones à l'apparition de problèmes environnementaux : érosion des sols, pollution environnementale par les engrais et les pesticides mais aussi sélection de maladies, ravageurs et mauvaises herbes résistantes aux traitements chimiques (Cox et Atkins 1979 ; Jackson et Piper 1989 ; Vandermeer et al. 1998 ; Griffon 2006 ; Duchene et al. 2017). Les préoccupations liées aux questions environnementales ainsi qu'à l'économie des intrants, pousse la réflexion des chercheurs à une amélioration de l'efficacité des systèmes de production agricoles à faible intrants. De ce fait, la nécessité de recourir à de nouvelles solutions agronomiques en considérant, comme le propose Griffon (2007), quatre variables qui sont : i) la quantité, ii) la qualité, iii) la production de services écologiques et iv) l'adaptation des systèmes de production au contexte de changement climatique. Dans ce contexte le recours à de nouvelles techniques tel que la diversification des agrosystèmes par l'augmentation du nombre d'espèces cultivées et par l'utilisation d'une part plus importante de légumineuses s'avère l'un des moyens de répondre aux enjeux de l'agriculture du futur (Latati et al. 2016 a&b ; Drevon et al. 2011 ; Bentencourt et al. 2012 ; Cong et al. 2014 ; Wang et al. 2015 ; Kaci et al. 2018).

Cette diversification peut être obtenue par l'augmentation du nombre d'espèces dans les rotations mais également par l'association d'espèces c'est à dire par la culture simultanée de deux espèces ou plus sur une même surface pendant une période significative de leur croissance mais sans nécessairement être semées et récoltées en même temps (Scott et al. 2012 ; Verma et al. 2014).

- Différents types d'associations :

Selon Ghanbari et Lee (2003), on peut trouver différents types d'associations, à savoir : i) des associations plantes annuelles/plantes annuelles, ii) des associations plantes annuelles/plantes pérennes, ainsi que iii) des associations plantes pérennes/plantes pérennes.

Cependant et selon le mode de mise en places des cultures associées on distingue quatre différents types d'associations :

- **Culture associée en rang :** cultiver deux ou plusieurs cultures simultanément dans des rangs réguliers. Ceci dit, il se peut qu'une ou plusieurs cultures peuvent être semées simultanément et en alternance ou bien peuvent être disposées au hasard dans les rangs.
- **Culture associée mixte :** cultiver deux ou plusieurs cultures simultanément sans suivre un arrangement régulier des rangs. Ce type d'association est souhaitable pour les associations légumineuses-cultures fourragères dans les systèmes à vocation pastorale.
- **Culture associée en bande :** Cultiver deux ou plusieurs cultures dans des bandes distinctes et assez large afin de permettre une mise en culture indépendante, mais assez étroite afin de favoriser les interactions ergonomiques des cultures.
- **Culture associée en relais :** Cultiver deux ou plusieurs cultures durant une partie du cycle de vie de chacune d'entre elles. Cependant, la deuxième culture est plantée après que la première ait atteint le stade de reproduction, mais avant qu'elle ne soit prête à récolter.

- Avantage des associations céréales-légumineuses :

Dans le but de développer une agriculture durable conciliant productivité et haute valeur environnementale, les associations céréales-légumineuses pourraient y contribuer fortement (Corre-Hellou et al. 2013). Bien qu'elles connaissent un regain d'intérêt, ces associations sont toutefois encore peu pratiquées.

Les associations céréales-légumineuses se caractérisent essentiellement par un gain de rendement global par rapport à des cultures « pures » (monospécifiques) et l'amélioration significative et quasi systématique de la teneur en protéines de la céréale, ceci quelle que soit sa proportion dans le mélange récolté (Jensen 1996a). Ce phénomène s'expliquerait par une meilleure utilisation des ressources du milieu probablement dû aux interactions interspécifiques comparativement aux

cultures monospécifiques correspondantes. Ces interactions interspécifiques peuvent être décrites comme l'effet d'une espèce sur le milieu et la réponse d'une seconde espèce à ce changement (Vandermeer. 1989 ; Goldberg. 1990). Vandermeer (1989) distingue ainsi deux types de réponses : la compétition qui intervient quand une espèce modifie l'environnement de façon négative pour la seconde (ombrage, extraction d'une ressource qui devient limitante...) et la facilitation lorsque ce changement est positif (allélopathie, effet barrière contre la diffusion de maladies...). A cela pourrait s'ajouter un troisième type de réponse, à savoir un effet neutre lorsque par exemple une espèce a accès à une ressource non disponible pour la seconde (utilisation de l'azote de l'air par la légumineuse, enracinement plus profond d'une espèce...). Il n'en reste pas moins que ces différentes interactions sont complexes car elles dépendent entre autres de la disponibilité en nutriments, du contexte pédo-climatique, des espèces et des cultivars associés mais aussi et surtout parce qu'elles se produisent en dynamique (Connolly et al. 1990).

Dans ce contexte, et dans le cas des associations céréales-légumineuses, plusieurs auteurs ont pu mettre en évidence, à l'aide de la méthode de dilution isotopique du ^{15}N et de compartimentation (Khan et al. 2010 ; Mayer et al. 2003), les effets de la légumineuse sur la facilitation de l'absorption de l'azote par la céréale (Stern 1993 ; Xiao et al. 2004). Ces phénomènes pourraient s'expliquer par la production d'exsudats riches en azote et relativement labiles par les racines de la légumineuse, exsudats qui seraient déposés dans la rhizosphère. Ces dépôts pouvant représenter jusqu'à 5% de l'azote total de la légumineuse se font sous forme de NH_4^+ (Brophy et Heichel 1989), de NO_3^- (Wacquant et al. 1989), d'acides aminés (Paynel et al. 2001) ou de matière organique en décomposition (Johansen et Jensen. 1996) et pourraient ainsi être utilisés directement ou après bio-transformation par la céréale associée ou la légumineuse elle-même.

L'une des principales hypothèses avancées pour expliquer l'avantage de l'association céréale – légumineuse pour l'amélioration du rendement et de la teneur en protéines de la céréale est une disponibilité en azote minéral par plante de céréale qui serait plus importante et mieux ajustée. Cela s'expliquerait en partie par un équilibre entre fixation et absorption d'azote minéral du sol par les deux espèces qui utilisent des sources d'azote différentes (Fujita et al. 1992 ; Tofinga et al. 1993 ; Hauggaard-Nielsen et al. 2001a&b ; Corre-Hellou. 2005 ; Hauggaard-Nielsen et al. 2003 ; Corre-Hellou et Crozat. 2004).

- Acquisition d'azote dans les systèmes d'association céréales-légumineuses :

Chez les légumineuses la mise en place des nodosités et leur activité se fait progressivement (Tricot et al. 1997 ; Voisin et al. 2002). De ce fait, la céréale et la légumineuse se retrouvent en compétition

directe pour l'azote minéral du sol en début de cycle végétatif (via leurs systèmes racinaires) du moment que c'est la seule source d'azote alors disponible (Oelbermann et al. 2015). Corre-Hellou (2005) suggère que les écarts d'enracinements et de demandes entre espèces en début de croissance déterminent le partage de l'azote minéral du sol. Cependant, la vitesse de progression du front racinaire des céréales et des légumineuses est différente (Hamblin et Tennant. 1987), mais aussi des écarts de demandes dès le début du cycle en raison notamment d'une vitesse de croissance plus rapide de la céréale (Bellostas et al. 2003 ; Andersen et al. 2004). Jensen (1996) décrit un avantage de la céréale pour l'acquisition de l'azote du sol du fait de son accès à une plus grande part de cette ressource traduisant une compétitivité interspécifique de la céréale supérieure à celle de la légumineuse.

De plus, cette compétitivité accrue de la céréale pour l'azote du sol se caractérise par une diminution significative de la quantité d'azote minéral présente dans l'horizon superficiel (zone de la fixation symbiotique), ce phénomène incite la légumineuse à accroître son activité fixatrice d'azote atmosphérique afin de répondre à ses besoins comparativement aux cultures pures (Croizat et al. 1994 ; Voisin et al. 2002). De ce fait, plus la légumineuse absorbe l'azote issu de la fixation symbiotique, plus le pourcentage d'azote minéral disponible dans le sol pour la céréale associée augmente, et ceci induit une grande quantité d'azote remobilisée dans les grains de la céréale qui aura pour conséquence une amélioration de sa teneur en protéines (Ofori et Stern 1987 ; Jensen 1996).

- Acquisition de la lumière dans les systèmes d'associations céréales-légumineuses :

Les feuilles ainsi que d'autres organes permettent aux plantes supérieures d'intercepter le rayonnement solaire nécessaire pour la photosynthèse et les assimilats carbonés pour la production de biomasse. Loomis et Williams (1963) rapportent qu'en l'absence de facteurs limitants tels que l'eau, les minéraux, les maladies, les ravageurs et les mauvaises herbes, le rendement et la matière sèche produite par une culture dépend essentiellement de la quantité du rayonnement absorbé. Dans le cas des associations, l'énergie lumineuse est avant tout disponible pour l'espèce dominante, ceci en raison de l'hétérogénéité du couvert végétal, de ce fait, l'interception du rayonnement solaire ne serait plus strictement dépendante de l'indice foliaire et du coefficient d'extinction de chaque espèce, mais aussi de la hauteur et de la dynamique de croissance des espèces associées (Sinoquet et Caldwell. 1995).

Dans ce contexte, la majorité des auteurs s'accordent à dire que la compétition verticale influence au plus haut point le partage du rayonnement solaire dans les associations (Spitters et Aerts 1983 ; Caldwell 1987 ; Cudney et al. 1991 ; Cenpukdee et Fukai 1992a, b). Cependant, dans certaines

situation, les espèces dominantes peuvent induire des conséquences parfois fatales sur les espèces dominées dû essentiellement à un ombrage quasi total (Caldwell 1987), alors qu'un ombrage partiel pourrait réduire les stress hydriques (Allen et al. 1977) et améliorer la photosynthèse et l'efficacité d'utilisation du rayonnement (RUE) de l'espèce dominée (Marshall et Willey 1983 ; Stirling et al. 1990) comparativement à l'espèce pure. Les phénomènes d'ombrage se traduisent également par des modifications au niveau des organes photosynthétiques en réduisant la taille et le poids spécifique des feuilles ainsi que l'augmentation de l'indice foliaire spécifique (Crookston et al. 1975 ; Sivakumar et Virmani 1980 ; Stirling et al. 1990 ; Watiki et al. 1993 ; Tsubo et al. 2001). Par ailleurs, une augmentation accrue de la hauteur des plantes accompagnée d'une réduction de la biomasse caractérise cette compétition pour la lumière (Hang et al. 1984 ; Stirling et al. 1990).

En association, les caractéristiques morphogénétiques de chaque espèce, la structure spatiale du peuplement ainsi que de la réponse de chaque espèce au statut azoté et plus généralement de la réponse aux compétitions inter et intraspécifiques déterminent la structure foliaire. La croissance foliaire quant à elle est déterminée par le statut azoté de la culture considérée comme étant un indicateur du niveau de satisfaction de la demande en azote (Lemaire et Gastal 1997 ; Gastal et Lemaire 1988). Par conséquent, la disponibilité en azote influencerait sur le partage du rayonnement en modifiant la proportion de chaque espèce dans la surface foliaire totale de l'association. Tsubo et Walker (2002) ont montré, à l'aide d'un modèle de partition du rayonnement dans les associations maïs-pois, que l'efficacité d'utilisation du rayonnement (RUE) de l'espèce dominée était supérieure à celle de l'espèce dominante. Pour autant, Gosse et al. (1986) ont démontré dans le cas des associations orge-pois que l'efficacité de conversion du rayonnement en biomasse du pois était inférieure à celle de la céréale, en raison essentiellement du coût énergétique de la fixation symbiotique. Enfin, Gastal et Bélanger (1993) ont montré que la disponibilité de l'azote modifiait davantage la surface foliaire que l'efficacité de conversion du rayonnement.

- Effet de l'association sur le rendement :

Selon Vandermeer (1989) l'association de culture peut induire deux types d'interaction: la compétition et la facilitation. La modification négative de l'environnement d'une plante sur l'autre (effet d'ombrage, réduction des ressources du milieu...) caractérise une interaction de compétition interspécifique, tandis qu'une amélioration positive des conditions du milieu pour l'espèce associée (réduction des maladies, des adventices, accroissement des ressources...) désigne une interaction de facilitation interspécifique (Bruno et al. 2003). Ces deux types d'interactions interviennent dans la productivité de l'association de culture, en réduisant ou en améliorant la productivité de

l'association des deux espèces.

De ce fait, les phénomènes de compétition peuvent induire un gain de rendement lorsque les deux espèces en association utilisent des niches différentes des ressources du milieu (Anil et al., 1998) ou lorsqu'il existe une facilitation d'utilisation des ressources du milieu d'une espèce vis à vis de l'autre (Willey 1979a). Plusieurs travaux ont démontré une plus grande stabilité des rendements dans le cas d'association céréales-légumineuse en comparaison avec leur culture pure respective (Wang et al. 2015 ; Kaci et al. 2018). Par ailleurs, Latati et al. (2013, 2014 et 2016a) montrent un plus grand rendement en grain pour la céréale associée dans le cas d'associations maïs-haricot et maïs-niébé comparativement aux monocultures.

Toutefois, dans le cas d'une association de culture avec une plante de couverture, il est généralement démontré que le rendement de la plante commerciale est pénalisé. Hilbrunner et al. (2007a) montrent que la réduction du rendement d'un blé associé à différentes espèces de plante de couverture peut dépasser 60% lorsque la compétition pour les ressources est intense. Cependant, Hauggaard-Nielsen et al. (2001a) suggèrent qu'il est possible d'améliorer la performance agronomique de ces associations de culture en réduisant par exemple la prolifération des adventices et les attaques par les maladies (interaction de facilitation).

IV. Les cycles biogéochimiques carbone, azote et phosphore :

IV.1. Le carbone :

Le carbone (C) est l'un des éléments constitutif de la vie sur terre, il est à la base des trois grandes familles de nutriments (glucides, lipides et protéines). Les formes organiques de C présentes dans les matériaux vivants en décomposition sont donc à l'origine des Matières Organiques des Sols (MOS) (Pansu et al. 2010).

Le carbone est présent dans tous les écosystèmes terrestres sous différentes formes inorganiques. On le retrouve dans l'atmosphère sous forme de dioxyde de carbone (CO₂), mais aussi sous d'autres formes de gaz carbonés en quantité infime comme le méthane (CH₄) et le monoxyde de carbone (CO). Les formes carbonatées sont aussi présentes dans la lithosphère et représentent les constituants majeurs (Pansu et al. 2010). Selon Schimel (1995) le cycle global du carbone est déterminé par les flux de C entre les différents compartiments terrestres à savoir l'atmosphère, l'hydrosphère, la biosphère et la lithosphère. Les échanges entre le CO₂ atmosphérique, les molécules organiques de la biosphère (sols, végétaux et animaux) et les carbonates de l'hydrosphère constituent les flux dominant de ce cycle (Raich et Schlesinger 1992).

Les systèmes physiques, biologiques ainsi que les températures globales sont influencés directement

par le cycle global du carbone, lui conférant alors une importance et une complexité qui a suscité l'intérêt de la communauté internationale ces deux dernières décennies. Les enjeux climatiques liés à l'émission de gaz à effet de serre surtout la hausse des émissions anthropiques de CO₂ dans l'atmosphère causée principalement par les activités humaines, ont valu une augmentation de la concentration en CO₂ atmosphérique estimée à l'ère préindustrielle d'environ 275 ppm contre 392.6 ppm en 2010 soit une augmentation de 117,6 ppm au cours des 260 dernières années (Chapagain and Riseman 2014; Tang et al. 2014).

- Le cycle global du carbone :

La figure 1 est une représentation simplifiée du cycle global du carbone. Suite aux travaux de Houghton (2007) qui a effectué une estimation des principaux réservoirs de carbone en milliards de tonnes métriques (Gt) pour l'année 2005. Les valeurs entre parenthèses représentées sur la figure correspondent à ces estimations.

Selon GIEC (2007), les flux de carbone entre la biosphère terrestre et l'atmosphère est d'environ 120 Gt par an et celui entre les océans et l'atmosphère est d'environ 90 Gt par an. Dans la biosphère terrestre la présence de végétaux supérieurs ayant la faculté photosynthétique éliminent environ 120 Gt du carbone atmosphérique. Par ailleurs, la décomposition de la matière biologique ainsi que la respiration liée aux végétaux et microorganismes du sol retournent environ 120 Gt de carbone dans l'atmosphère.

De plus, les écosystèmes marins et par l'intermédiaire de la photosynthèse phytoplancton transforme le CO₂ en carbone organique qui est en grande partie retourné à l'atmosphère sous forme de CO₂ par la respiration microbienne et la décomposition (GIEC 2007).

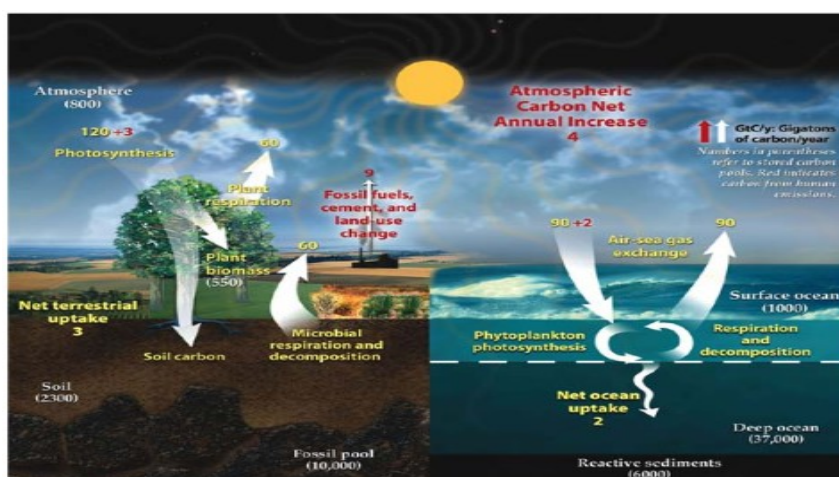


Figure 1: Le cycle global du carbone (DOE, 2008).

- La matière organique et le carbone du sol :

La matière organique est la source d'énergie des premiers êtres vivants de la chaîne trophique de la pédofaune à l'exception des sols très acides ou des sols des régions froides. De ce fait, la diversité, l'abondance et l'intensité de l'activité de la flore et de la faune du sol sont directement influencé par la qualité de la matière organique. Cette activité de la flore et de la faune du sol affecte directement sur les propriétés physiques et chimiques des sols (Alvarez et al. 1998). La séquestration du carbone est fortement liée au processus d'agrégation (Golchin et al. 1994 ; Angers et Chenu 1998, Alvarez et al. 1998 ; Post et Kwon 2000), ce processus ainsi que la stabilité structurale des sols augmentent avec la teneur en matière organique (Balesdent et al. 2000 ; Six et al. 2002). Cela induit une forte porosité et accroît la dynamique des fluides du sol. L'eau de pluie pénètre alors plus facilement, augmentant la réserve en eau du sol et diminuant la sensibilité à l'érosion. Le carbone contenu dans la matière organique des sols représente la plus grande partie du carbone terrestre. Il constitue le principal indicateur de la qualité des sols tant pour les propriétés physiques et chimiques que biologiques des matières organiques qui le contiennent.

La présence de groupements carboxyles fonctionnels et de phénols dans la matière organique du sol (principalement présente sous formes de substances humiques), lui confère ainsi une capacité d'échange très importante (400 à 800 cmole kg⁻¹). Elle est donc un réservoir réel ou potentiel (suivant le taux de saturation) de cations nutritifs. La matière organique est capable de fixer et d'inhiber des composés (pesticides, xénobiotiques) ou des traces d'éléments minéraux (Al, Fe, Cu...) en formant des chélates (Robert 1996).

La dégradation des sols est due à une certains nombre de contraintes de nature physique, chimique et biologique. Ces contraintes peuvent affecter la production agricole ou l'environnement global (Robert 1996).

Selon Robert (1996, 2002), d'un point de vue environnemental, les propriétés modératrices des sols sont augmentées par la matière organique. Elle emmagasine ou même séquestre le carbone à partir du CO₂ (gaz à effet de serre), elle augmente le temps de conservation des réserves d'eau du sol et diminue donc les besoins d'irrigation, elle limite le ruissellement et donc diminue les risques d'inondation par l'écêtement des crues et elle limite le transfert des polluants par effet de stockage.

Du point de vue agronomique, les teneurs en carbone et en matière organique (MO) diminuent sensiblement après la mise en culture des sols. Selon Balesdent et al. (2005), cette diminution est la conséquence soit de l'érosion avec exportation des agrégats, soit du travail du sol conduisant à la minéralisation. Il en résulte une diminution de la fertilité chimique et une dégradation physique

(taux d'agrégation, stabilité structurale, rétention en eau, perméabilité), et par conséquent, une augmentation de la compaction, des risques d'érosion, et de la sensibilité à la battance (Taboada et al. 1998).

D'un point de vue chimique, l'azote (N) et le phosphore (P) issus de la minéralisation de la matière organique du sol s'associent au carbone pour former les composés organiques. Selon Mayumi Tokura et al. (2002), le recyclage des éléments nutritifs N, P et S, par la décomposition graduelle des résidus végétaux en agriculture extensive (à faibles entrants) constitue le facteur principal de la durabilité des agrosystèmes.

La matière organique du sol a une composition très complexe et hétérogène, du fait qu'elle soit souvent mélangée ou associée aux constituants minéraux du sol. Elle est constituée par des organismes vivants (protozoaires, champignons, bactéries, etc.), les substances qu'ils synthétisent et majoritairement par des résidus organiques principalement d'origine végétale à différents stades de décomposition. De plus, ces organismes vivants de taille microscopique appelés communément « biomasse microbienne » (BM) constituent une matrice de transformation pour les matières naturelles organiques dans le sol et agit comme un réservoir labile de nutriments disponibles pour les végétaux (Ladd et al. 1992).

IV.2. L'azote :

Environ 98% de l'azote sur terre se trouve dans la partie solide de la terre : les roches, les sols et les sédiments. Le reste se déplace dans un cycle dynamique impliquant l'atmosphère, l'hydrosphère (les océans, les mers, les lacs et les cours d'eau) et la biosphère (Loiseau et Decau 1995). L'azote dans l'atmosphère existe principalement sous forme d'azote moléculaire (N_2), qui constitue à lui seul 78% des gaz de l'atmosphère. Le reste est sous forme de traces (ammoniac gazeux, protoxyde d'azote, acide nitrique et, particules de nitrate, et l'azote organique). Les composés atmosphériques d'azote rejoignent les sols et les eaux par des dépôts humides et secs. Au cours du cycle de l'azote, les molécules sont transformées à travers de nombreux processus biogéochimiques, pour la plupart de type redox. Dans l'hydrosphère, l'azote existe sous forme organique ou inorganique soluble. Cependant, dans le sol la plupart de l'azote est sous forme organique. Il est rendu disponible pour les plantes par minéralisation liée à l'activité des microorganismes (Pansu et al. 2010).

Selon Pansu et al. (2010) la matière organique constitue la principale réserve d'azote du sol. On peut distinguer deux fractions en fonction de la vitesse de décomposition :

- une à décomposition rapide,
- une à décomposition plus lente, constituée de composants humifiés à minéralisation lente.

- Seule une petite fraction se trouve sous des formes inorganiques ammoniacale (NH_4^+) et nitrique (NO_3^-) utilisables pour les cultures.

- Les formes de l'azote :

- L'azote organique :

L'azote organique constitue 85 à 95 % de l'azote total du sol. Cette fraction peut être composée jusqu'au 50% d'acides aminés et d'une proportion réduite de sucres aminés. Le reste est constitué par des formes difficilement identifiables ou des composants de la partie des hétérocycles des molécules humiques qui sont stables et de dégradation lente (Loiseau et Decau 1995).

Les réserves minéralisables à court terme sont issues de la matière organique fraîche, des fractions les plus labiles de la matière organique humifiée, de la biomasse morte et des chaînes peptidiques (Campbell 1978).

La biomasse microbienne représente en moyenne entre 4 et 8 % de l'azote total du sol. Elle constitue la fraction la plus labile de la matière organique. Elle est une des sources principales de d'azote disponible pour les plantes (Pansu et al. 2010).

- L'azote inorganique :

L'azote inorganique du sol constitue la fraction disponible pour les cultures. Le sol en contient rarement plus de 10% d'azote inorganique total. Selon Baldock et Nelson (2000), dans les sols à texture grossière ayant peu de capacité à immobiliser ou adsorber NH_4^+ dans les minéraux argileux, la fraction inorganique varie de 1 à 3 %. C'est sous la forme de nitrates (NO_3^-) qu'il est principalement absorbé par les plantes.

- Le cycle de l'azote :

L'azote circule selon un cycle biogéochimique au cours duquel il passe sous des formes organiques et minérales (Jego et al. 2008). La plupart des transformations d'azote impliquent l'oxydation ou la réduction de l'atome d'azote par les deux moyens biologiques et physicochimiques (Figure 2). Dans l'atmosphère, l'azote existe principalement sous forme de N_2 qui correspond à 78 % des gaz atmosphériques. La transformation de N_2 en d'autres formes nécessite de l'énergie pour briser la liaison (Cellier et al. 2015).

L'azote est présent dans le sol sous plusieurs formes. L'azote organique constitue la principale forme de stockage dans un sol agricole, essentiellement depuis les formes d'enzymes et de protéines. Il existe sous forme d'ions comme les nitrates, les nitrites et l'ammonium, qui en dehors des périodes d'apport d'engrais ne représentent généralement que quelques dizaines de kilogrammes par hectare, et comme gaz (exp: NH_3 , N_2O , N_2) (Cellier et al. 2015). Dans le système

sol-plante-atmosphère, le cycle de l'azote comporte un grand nombre de transformations, il s'agit de processus en grande partie de nature biologique et dans une moindre mesure physico-chimique, agissant parfois de façons concurrentes et dont l'intensité dépendrait à la fois des conditions du milieu, des apports de matière organique, et des pratiques agricoles (Nicolardot et al. 1996).

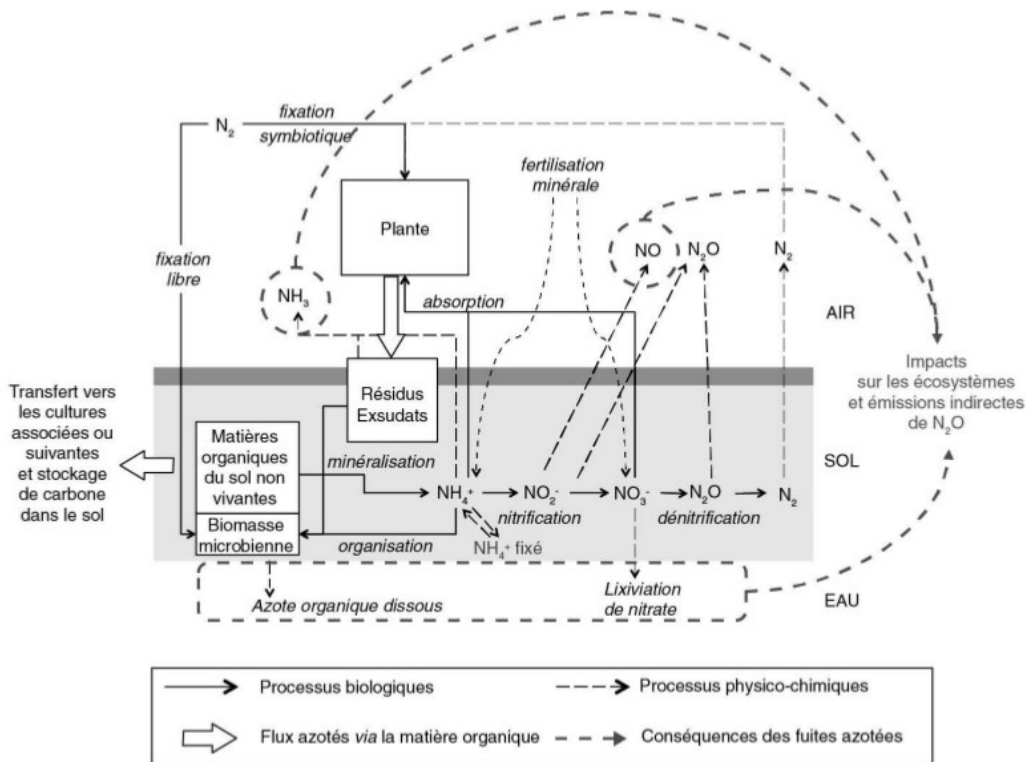


Figure 2 : Cycle de l'azote au sein d'une culture avec un focus sur la dynamique de l'azote dans une culture de légumineuses (fixation symbiotique et matière organique) et sur les fuites d'azote réactif vers l'environnement : atmosphère (NH₃, N₂O, NO, N₂) et eaux (NO₃⁻) (Cellier et al. 2015).

- Processus de gain d'azote :

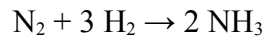
La majeure partie de l'azote atmosphérique que l'on retrouve dans les organismes supérieurs est due à la fixation biologique bactérienne. Elle représente environ 60 % de l'azote total. Le rayonnement ultraviolet et la foudre contribuent pour 15 %. Le reste provient de l'industrie des engrais (Mengel et Kirby 2000).

- La fixation biologique de l'azote :

Selon Cellier et al. (2015), la fixation biologique de l'azote est le processus biochimique le plus important après l'assimilation du CO₂. Elle assure la transformation de l'azote gazeux atmosphérique en ammoniac. Seuls quelques micro-organismes diazotrophes sont capables d'assurer ce processus, parmi lesquels on distingue :

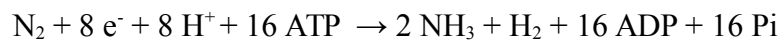
- les bactéries libres vivant dans le sol (Klebsiella et Azotobacter), les cyanobactéries ;
- les rhizobactéries, bactéries symbiotiques vivant en association avec les légumineuses dans des structures racinaires ou caulinaires organisées appelées nodosités.

Ces bactéries et certaines levures sont capables de réduire l'azote suivant la réaction globale :



La fixation biologique de l'azote est catalysée par un complexe enzymatique : la Nitrogénase/Hydrogénase. La réaction, réalisée par les fixateurs biologiques, exige 8 électrons et 8 protons pour la réduction, et 16 ATP pour la fourniture de l'énergie d'activation.

La réaction globale devient :



Dans le cas de la symbiose rhizobium-légumineuse, l'activité symbiotique se met en place à travers des structures localisées au niveau racinaire, appelées nodosités, où sont hébergées les bactéries fixatrices. Dans les nodosités, se forme une protéine spécifique appelée leghémoglobine. La fonction de la leghémoglobine est de maintenir la pression de l'oxygène à un niveau assez bas dans l'environnement de la nitrogénase, très sensible à l'oxygène (Mengel et Kirby 2000).

- Apports d'azote inorganique atmosphérique :

L'azote atmosphérique peut également contenir certaines formes d'azote autres que du N_2 . On trouve par exemple du NO et du NO_2 issu de la combustion du pétrole, de la biomasse végétale ou des décharges électriques. Cependant, il faut savoir qu'une molécule de NO_2 est 200 fois plus efficace qu'une molécule de CO_2 pour créer un effet de serre. On peut trouver du NO_3^- et du NH_4^+ dans les poussières atmosphériques. Cet azote peut retourner au sol sous diverses formes. Les oxydes azotés (NO_x) réagissent avec des OH^- et forment de l'acide nitrique, composant des pluies acides (Cellier et al. 2015).

- Fertilisation et amendements :

Les ions NH_4^+ et NO_3^- provenant de la fertilisation ont un comportement équivalent à celles provenant de la décomposition des résidus organiques. Leur concentration dans des zones localisées du sol tend à générer des conditions favorisant les processus de perte telles que la dénitrification ou la volatilisation (Nicolardot et al. 2001).

- Processus des pertes d'azote :

- Dénitrification :

La dénitrification c'est le processus réductif résultant de l'action de microbes anaérobies et se traduisant par la transformation des nitrates en nitrites, puis en composés ammoniacaux et

finalement en azote gazeux et oxydes d'azote perdus pour le sol. Elle se produit principalement en sol soumis à des conditions d'anaérobiose (Rodriguez et Giambiagi 1995).

Les conditions que favorisent la dénitrification sont un pH du sol neutre à légèrement basique, une température autour de 25°, des conditions anaérobies, la présence de substrats azotés et de substrats carbonés (Rodriguez et Giambiagi 1995).

- Volatilisation :

La volatilisation est la perte d'azote, à partir du sol ou d'une matière fertilisante, par dégagement direct dans l'atmosphère de N₂, d'oxyde d'azote ou d'ammoniac. Cette voie de perte est favorisée dans les sols alcalins, les sols de faible capacité d'échange cationique ou les sols secs (Hargrove 1988). Bien que les pertes les plus importantes soient liées à l'application d'urée et des lisiers riches en NH₄⁺, on en observe également sur des parcelles immédiatement après l'application de différents types d'amendements organiques. Dans un système de production la sous-estimation des pertes par volatilisation a pour conséquence la sous-estimation de la fertilisation. D'autre part, la surestimation entraîne une «sur-application» et par conséquent le risque d'augmenter les pertes par lixiviation (Eghball et al. 1997 ; Palma et al. 1998 ; Sommer et Hutchings 2001 ; Chantigny et al. 2004).

- Lixiviation :

L'azote sous forme NO₃⁻ est très vulnérable à la lixiviation. Les NO₃⁻ (issus de la minéralisation ou de la fertilisation) s'accumulant dans les horizons de surface, peuvent être entraînées en profondeur. Dans les sols agricoles ce risque de perte est dépendant de la présence de nitrates dans le profil et d'un volume d'eau capable de le transporter (Ramos et Kücke 1999; Rimski-Korsakov et al. 2000).

- Le cycle interne de l'azote du sol :

Dans le cycle global de l'azote, on peut différencier la partie propre au sol. La caractéristique principale de ce cycle interne est qu'il peut se résumer en deux processus biologiques opposés : la minéralisation et l'immobilisation (Cellier et al. 2015).

La minéralisation comprend tous les processus au moyen desquels l'azote organique devient azote ammoniacal, comme résultat de l'activité de la microfaune hétérotrophe du sol. En revanche, l'immobilisation est la conversion de l'azote inorganique en formes organiques constitutives des microorganismes (Cellier et al. 2015).

La relation entre ces deux processus est à la base de l'étroite relation entre les cycles du carbone et de l'azote.

La minéralisation est un processus qui se déroule en deux étapes. Dans un premier temps, différents microorganismes hydrolysent les protéines et les acides aminés de la matière organique en

produisant de l'ammonium. Cet ammonium est ensuite oxydé en nitrite et immédiatement en nitrate par des microorganismes spécifiques (Cellier et al. 2015).

- Ammonification :

Comme évoqué précédemment, c'est le processus par lequel les bactéries, les champignons et les actinomycètes peuvent libérer l'azote de leurs composants azotés. Par son manque de spécificité, ce processus peut avoir lieu dans une large gamme de température, d'humidité et de pH du sol (Cellier et al. 2015).

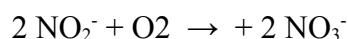
- Nitrification :

La nitrification est le processus d'oxydation biologique de l'azote réalisé par des microorganismes du sol au cours duquel l'azote passe de la forme ammoniacale à la forme nitrique en deux stades successifs : la nitrification et la nitrification (Bonde & Lindberg 1988).

La nitrification est produite par des microorganismes hétérotrophes ou autotrophes ; ces derniers sont les plus importants. Les conditions optimales pour la nitrification sont plus restrictives que pour l'ammonification. Les sols neutres ou légèrement basiques favorisent la nitrification. La teneur en oxygène affecte la nitrification car il s'agit d'un processus aérobie. L'humidité constitue un autre facteur déterminant, l'optimum se situant autour de 60% de la capacité au champ (Bonde & Lindberg 1988).



soit :



IV.3. Le phosphore :

Le phosphore (P) est après l'azote l'élément nutritif le plus important pour la croissance et le développement des plantes cultivées. Il est l'un des rares sinon le seul élément qui participe au transfert d'énergie (Sinclair et Valdez 2000). Par ailleurs, le P provenant des sols agricoles est aujourd'hui la principale cause de l'eutrophisation des eaux de surfaces où il entraîne la prolifération d'algues bleues (Foy 2005). L'amélioration de notre compréhension des mécanismes et processus qui affectent le cycle du P dans les sols agricoles est donc déterminante pour le développement de pratiques de gestions adéquates du P (Hinsinger et al. 2011a).

Gallet et al. (2003) ont montré qu'en absence d'application d'engrais, le P du sol diminue et dans une certaine mesure affecte le rendement des cultures, inversement, l'application de P en excès des besoins des cultures résulterait en une accumulation du P dans la couche labourée. Cette

accumulation augmenterait le risque de perte de P vers les eaux de surface avec des conséquences sur le fonctionnement des écosystèmes.

De ce fait, le bilan des éléments est un outil diagnostique permettant d'évaluer la durabilité des écosystèmes cultivés (Goodlass et al. 2003). Le bilan inclut les flux entrant et sortant des éléments dans le profil du sol dans les limites de la parcelle cultivée (Oenema et al. 2003). Théoriquement, il peut être défini comme la différence entre les apports et les exportations cumulés au sol associée au système de culture (Tunney et al. 2003). Pour le P, les apports recrutent le P dans les engrais, dans la fumure organique, et d'autres sources telles que les matières résiduelles fertilisantes, les graines et les dépositions atmosphériques (Maguire et al. 2008; Blake et al. 2000). Les exportations incluent le P prélevé dans les produits de récoltes, généralement les graines mais aussi les résidus de culture (Blanco-Canqui et al 2009) ou les pertes par ruissellement, lixiviation et érosion éolienne (Heckrath et al. 1995). Lorsque les apports et les exportations sont équilibrés, il est généralement admis que le système de culture est durable, mais cette assertion n'est pas correcte si le statut du P est trop faible pour une croissance optimale, ou très élevé avec un risque de perte de P (Duchene et al. 2017).

- Statut du phosphore dans les sols :

Le P représente environ 0,12% des éléments constitutifs de l'écorce terrestre (Cathcart 1980). Les gisements de phosphate naturel dont la teneur est comprise entre 100 et 140 g P kg⁻¹ constituent les principales sources de P dans le monde (Morel 2002). Les principaux gisements de phosphate naturel se trouvent au Maroc (35%), en Chine (23%), en Afrique du sud (9%), en Jordanie (9%) et aux États-unis (6,8%) (U.S. Geological Survey 2010). Le P dans les phosphates naturels est généralement sous forme apatitique. Cette forme de P est peu soluble à l'eau. Tous les engrais phosphatés sont produits à partir de l'acide phosphorique qui est obtenu en faisant réagir les phosphates naturels et l'acide sulfurique. Dans la couche arable des sols de grandes cultures des régions tempérées, le P varie entre 100 et 2000 mg P kg⁻¹ sol, ce qui représente entre 350 et 7000 kg P ha⁻¹ (Grant et al. 2005). Les plantes prélèvent du sol en moyenne 30 kg P ha⁻¹ an⁻¹ pour satisfaire leurs besoins. Deux tiers environ des quantités prélevées sont exportés hors de la parcelle cultivée et le reste est restitué au sol par les résidus de culture (Morel 2002).

- Cycle biogéochimique du phosphore dans les écosystèmes cultivés :

Le cycle biogéochimique du P dans les parcelles cultivées (Fig. 3) intègre l'ensemble des stocks de P dans le sol, les réactions de transformation et les flux impliqués dans la circulation entre les différentes composantes de l'écosystème (Morel 2002).

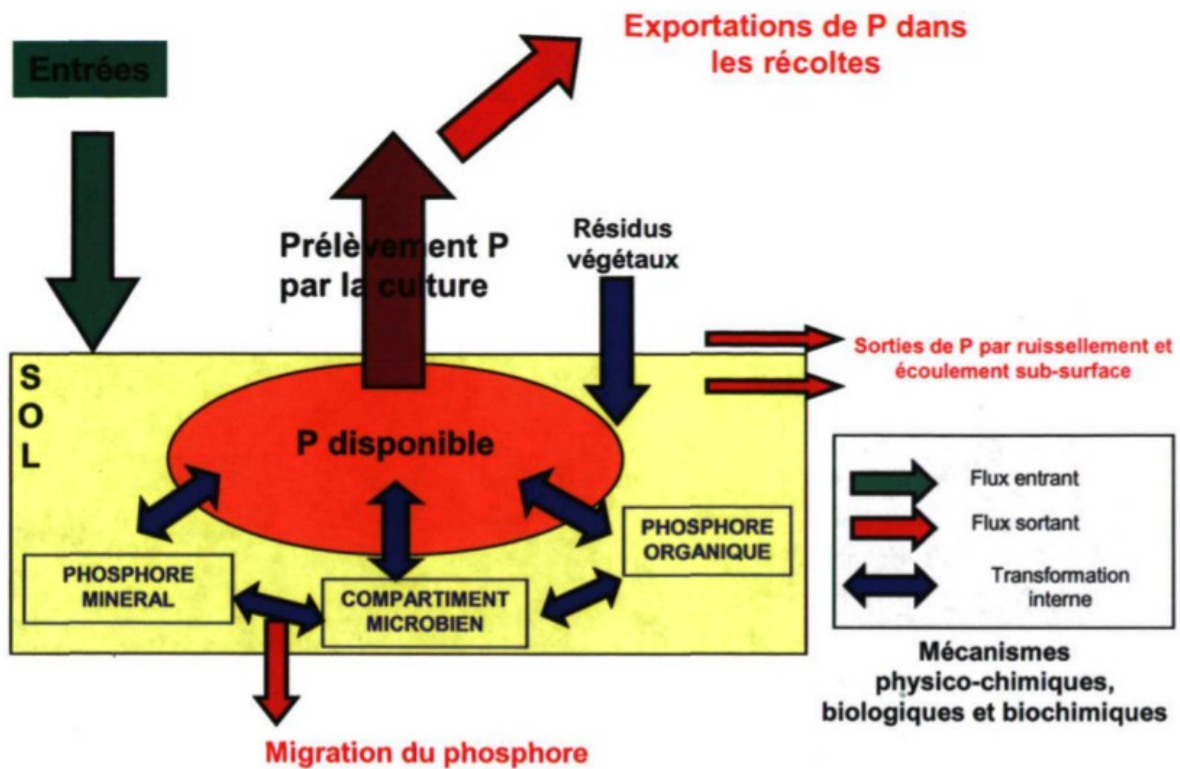


Figure 3 : Cycle biogéochimique de P dans les parcelles cultivées

(Source: adapté de Morel, 2002).

Le P peut être introduit dans la parcelle cultivée sous la forme d'engrais minéraux ou de ferme (fumiers, fientes, lisiers), de P contenu dans les semences, de matières résiduelles fertilisantes (boues de stations d'épuration, composts...), ou de dépôts atmosphériques (Gagnon et al. 2010; Morel 2002). Les résidus de culture constituent aussi une source de P du sol. Les différents compartiments que sont le P minéral, organique et microbien interagissent sous l'effet de mécanismes physico-chimiques, biologiques et biochimiques. On peut citer les réactions d'échange d'ions, d'adsorption et de désorption, de précipitation et de solubilisation, de diffusion intraparticulaire, de minéralisation et d'immobilisation, d'oxydo-réduction, acido-basiques. Ces réactions peuvent entraîner la libération des ions P depuis la phase solide vers la solution ou, au contraire, soustraire des ions P de la solution au profit de la phase solide (Morel 2002).

Une partie du P du sol est exportée hors de la parcelle cultivée avec les produits récoltés, les parties aériennes ou simplement les graines. Les sorties de P de la parcelle cultivée se font aussi sous forme de pertes par lixiviation, ruissellement de surface et de profondeur et écoulement préférentiel (Haygarth et Sharpley 2000; Simard et al. 2000; Breeuwsma et al. 1995). La différence entre les

entrées et les sorties de P à l'échelle de la parcelle cultivée est exprimée sous la forme d'un bilan phosphaté. Lorsqu'il est correctement estimé, il peut constituer un bon indicateur pour suivre les évolutions du statut de P du sol dans le temps (Meals et al. 2008; Blake et al. 2000).

Le calcul du bilan de P peut se faire de manière simple en intégrant uniquement les entrées de P par les différentes sources d'engrais et les sorties par les produits récoltés (Blanco-Canqui et al 2009; Giroux et al. 2002; Beck et Sanchez 1996). Cependant, les nouvelles connaissances sur l'impact environnemental du P, le rôle du P dans l'eutrophisation des cours d'eaux et lacs, imposent une estimation beaucoup plus précise des entrées et sorties de P à l'échelle de la parcelle cultivée (Tunney et al. 2003; Oenema et al. 2003). Il devient ainsi important de quantifier les pertes de P par lixiviation, ruissellement de surface et de profondeur et les écoulements superficiels (Simard et al. 2000).

- Formes de phosphore dans les sols :

Le P est présent dans les sols cultivés sous trois formes : le P inorganique qui représente 75 % du P total, le P organique, 20 % et le P associé à la biomasse microbienne, 5 % (Grant et al. 2005). Le P inorganique dans le sol se trouve dans la solution sous forme d'ions orthophosphates (H_2PO_4^+ et HPO_4^+). Il est aussi lié au fer, à l'aluminium et au calcium (Pierzynski et al. 2005). Le P organique du sol est défini comme celui lié au carbone. Il provient des restes d'animaux, des résidus de végétaux et est synthétisé par les micro-organismes du sol (Kuo 1996). Il se retrouve dans le sol sous forme de phosphate d'ester, d'inositol phosphate, d'acide nucléique et de phospholipide (Corbridge 2000; Smith et Read 1997). Les ions orthophosphates absorbés par les micro-organismes du sol rentrent dans leur constitution en se liant au carbone par phosphorylation (Condron et al. 2005).

- Phosphore inorganique :

Le P inorganique dans le sol est reparti en ions orthophosphates libres dans la solution, en ions phosphates adsorbés sur la phase solide, en ions phosphates précipités avec les oxydes, les hydroxydes de fer et d'aluminium et les carbonates de calcium (Morel 2002).

- Phosphore de la solution du sol :

Les concentrations de P dans la solution du sol sont généralement faibles (Barber 1995) et varient entre 0,02 et 1,2 mg P L⁻¹ (Kovar et Barber 1988; Reisenauer 1964; Barber 1995). Les formes ioniques dominantes sont les ions H_2PO_4^- et HPO_4^{2-} . Ces formes sont influencées par le pH de la solution du sol : à des pH inférieurs à 7,2, la forme H_2PO_4^- prédomine et aux pH supérieurs à 7,2, la forme HPO_4^{2-} prédomine. A pH égal à 7,2 les deux formes s'équilibrent (Pierzynski et al. 2005;

Barber 1995) (Fig. 4). Dans les sols riches en matière organique, la solution du sol peut contenir des quantités importantes de composés organiques solubles qui peuvent améliorer le statut phosphaté de la solution.

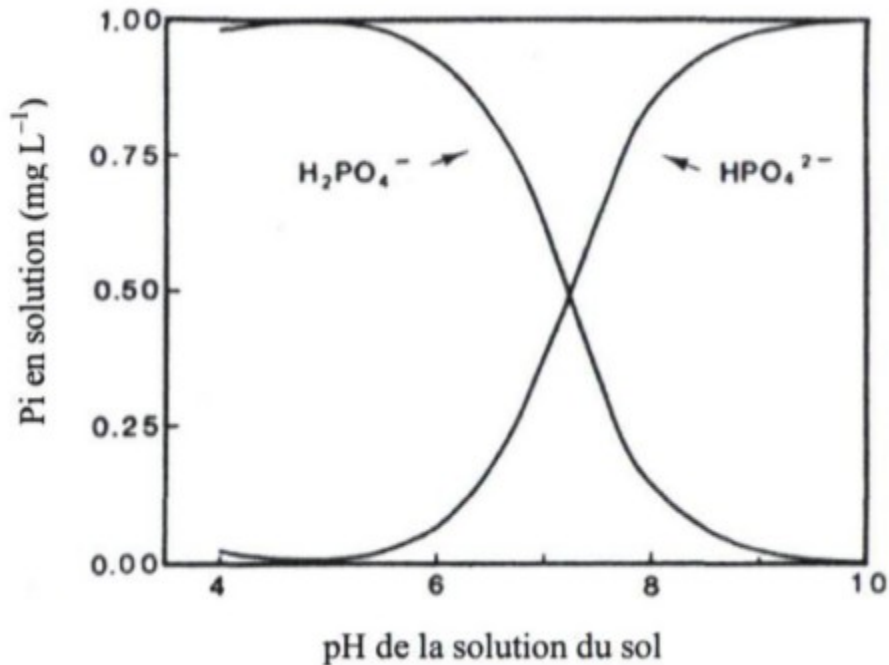


Figure 4 : Effet du pH de la solution du sol sur les formes ioniques de P en solution (Barber 1995).

Lorsque les sols reçoivent des apports de P sous forme d'engrais, la concentration en ions phosphates de la solution peut augmenter indépendamment du statut phosphaté et du type de sol (Kovar et Barber 1988). Cette augmentation de la concentration en ions phosphates est bénéfique pour la croissance des plantes cultivées, mais peut aussi constituer un risque pour l'environnement. Sur trente trois sols étudiés aux États-Unis, Kovar et Barber (1988) ont montré que l'augmentation de la concentration en ions phosphates suite à l'apport de P sous forme d'engrais peut être définie par une relation curvilinéaire du type :

- Phosphore adsorbé et précipité :

Le P apporté au sol sous forme d'engrais peut réagir avec les oxydes, les hydroxydes de fer et d'aluminium (Holford et Patrick 1979) et les carbonates de calcium (Mattingly 1975). Ces réactions peuvent être une adsorption du P à la surface de ces composés ou une précipitation sous forme de composés stables. L'adsorption du P avec le fer et l'aluminium se déroule principalement dans les sols acides alors que celle avec les carbonates de calcium a lieu dans les sols alcalins. Malgré l'importance des études sur la compréhension des mécanismes d'adsorption et de précipitation du P

dans les sols de différents écosystèmes, il subsiste toujours une controverse sur la quantification de la proportion de P apportée au sol qui sera adsorbée ou précipitée (Betencourt et al. 2012).

Tang et al. (2015) ont montré qu'une augmentation équivalente à moins de 9 mg P l⁻¹ dans la solution du sol résulte en une adsorption de P mais au-delà, le P précipite avec les oxydes de fer et d'aluminium et les carbonates de calcium selon le type de sol.

Le P adsorbé joue un rôle important dans le réapprovisionnement de la solution du sol. En effet, lorsque la concentration en P de la solution du sol diminue suite au prélèvement par les racines des plantes, le P adsorbé diffuse vers la solution afin de rétablir l'équilibre phosphaté entre celle-ci et la phase solide. Des études basées sur l'utilisation du ³²P ont montré que le rétablissement de l'équilibre entre la solution et la phase solide est un processus qui se déroule en deux temps : une phase initiale caractérisée par un taux de diffusion rapide et une phase d'équilibration lente. Le P adsorbé qui équilibre rapidement la solution pendant les premières 24 ou 48 heures est appelé arbitrairement P labile alors que le P de la phase lente est appelé P non-labile (van Riemsdijk et al. 1984). Il en ressort une double classification du P de la phase solide : le P adsorbé et le P précipité d'une part, le P labile et non labile d'autre part. La deuxième classification revêt un grand intérêt du point de vue nutrition puisqu'elle permet de comprendre la cinétique des ions phosphates entre la solution et la phase solide. Elle permet aussi de quantifier le stock d'ions phosphates du sol susceptible de contribuer à la nutrition des plantes cultivées (Betencourt et al. 2012).

- Phosphore organique :

Le P organique représente environ 20 % du P total dans l'horizon arable des sols et peut atteindre jusqu'à 50 %. Sa teneur dans les sols est fonction de celle de la matière organique qui contient 0,5 % de P (Morel 2002). Le P organique du sol peut être regroupé en quatre classes : la classe des monoesters d'orthophosphate qui sont des esters d'acide phosphorique incluant l'inositol phosphates, les sucres phosphatés, les phospho-proteines et les mono-nucléotides (Morel 2002). La classe des phosphates diesters qui inclut l'ADN, l'ARN, les phospholipides, l'acide teichoic et les composés aromatiques. La classe des phosphonates qui inclut les acides phosphoniques et les phosphonolipides caractérisés par des liaisons C-P au lieu des liaisons esters. La classe des orthophosphates anhydrides (O'Halloran et Cade-Menum 2007). Ces formes de P organiques ont été mises en évidence grâce aux techniques d'analyse telles que la résonance magnétique nucléaire au ³¹P et l'hydrolyse enzymatique (Condron et al. 2005). Les acides nucléiques sont plus abondants dans la matière organique fraîchement incorporée au sol, mais du fait de leur dégradation rapide, leur teneur dans le sol est généralement faible (Barber 1995). La minéralisation de la matière

organique contrôle la libération du P organique dans la solution du sol. Les microorganismes jouent un rôle important dans la minéralisation du P organique à travers des processus complexes qui sont encore très mal compris. Ces processus peuvent cependant être séparés en trois catégories (Turner et al. 2006): l'acquisition du P des formes stables, la minéralisation du P des résidus ajoutés au sol et la minéralisation du P de la biomasse microbienne (Latati et al. 2016 a). Les microorganismes peuvent aussi retenir dans leurs cellules le P issu de la minéralisation, on parle alors d'immobilisation. Ce processus est très important notamment dans les sols des tropiques, parce qu'il empêche l'adsorption de ce P par le sol. La plus grande contribution du P organique à la nutrition des plantes cultivées a lieu sous les tropiques où règnent des températures élevées favorables à une minéralisation rapide de la matière organique (Tang et al. 2014). Le P organique existe aussi sous forme de composés solubles dans la solution du sol. Cependant, leur contribution à la nutrition des plantes demeure incertaine. Les composés organiques solubles dérivés du P organique jouent un rôle important dans l'environnement en contribuant au processus d'eutrophisation des eaux de surface (Morel 2002).

- Phosphore du sol disponible aux plantes :

La disponibilité de P, définie comme le flux de P susceptible d'être absorbé par une plante, est gouvernée par l'absorption racinaire et par la disponibilité chimique de P dans le sol (Hinsinger et al. 2011a). Elle est aussi influencée par des processus physico-chimiques et biochimiques qui ont lieu dans la rhizosphère. Le siège du prélèvement de P est la solution du sol. Les espèces absorbées par les racines sont les ions orthophosphates. Cette absorption entraîne une diminution de la concentration des ions orthophosphates dans la solution du sol. Le réapprovisionnement de la solution du sol se fait à partir de la phase solide du fait d'un gradient de concentration qui s'établit entre les deux phases. Quantitativement, la solution du sol ne joue qu'un rôle minime dans la nutrition phosphatée. Des études ont montré que environ 99% du P prélevé des plantes au cours d'un cycle de culture proviennent de la phase solide (Morel 2002; Grant et al. 2005). Le transfert du P de la phase solide vers la solution se fait par diffusion et de nombreux mécanismes rhizosphériques peuvent intervenir dans ce changement de phase (Hinsinger 2011b; Hinsinger et al. 2005 ; Haygarth et al. 2018).

De nombreuses méthodes permettent de caractériser la disponibilité du P du sol. Certaines permettent de déterminer un stock de P potentiellement accessible aux plantes et reposent sur des extractions chimiques. D'autres méthodes permettent de déterminer la quantité d'ions orthophosphates en solution en utilisant une extraction à l'eau. Enfin quelques-unes permettent de déterminer par des techniques de sorption et désorption des indicateurs de P de la solution du sol et

de la phase solide du sol : Il s'agit de l'intensité qui est la concentration d'ions phosphates dans la solution du sol et la quantité d'ions phosphates présents sur la phase solide et capable de réapprovisionner la solution après une absorption d'ions phosphates par les plantes (Redding et al. 2006; Grant et al. 2005).

- Labour et phosphore du sol :

Dans les sols non labourés, on observe une accumulation du P dans les premiers centimètres au dessous de la surface du sol (Saavedra et al. 2007; Selles et al. 1997). Bertol et al. (2007) ont observé une accumulation du P disponible dans un sol sous semis direct cinq fois supérieur à celui des sols labourés. Il a aussi été observé que dans la couche non labourée, le P s'accumule principalement sous sa forme soluble laquelle est sujette au transport vers les cours d'eau par ruissellement (Sharpley et Smith, 1994; Muukkonen et al., 2007; Redel et al., 2007). Les mécanismes qui mènent à une accumulation du P sous sa forme soluble dans la couche superficielle des sols sous semis direct sont très peu documentés. Pour certains auteurs, l'accumulation du P sous sa forme soluble serait liée à la minéralisation de la matière organique accumulée dans les premiers centimètres du sol (Beck et Sanchez 1994; Redel et al. 2007). Pour d'autres, ce serait l'amoncellement des engrais minéraux non dissous dans la couche superficielle du sol suite à une mauvaise incorporation (Guo et al. 2000; Borie et al. 2000).

Dans les sols non labourés, 30% de la surface reste couverte de résidus de végétaux et le sol est peu perturbé. Pendant l'hiver, ces résidus peuvent être altérés suite à l'alternance du gel et du dégel qui exerce une force abrasive. Le P contenu dans leurs structures cellulaires peut ainsi être libéré et contribuer au P de la couche superficielle du sol. Les résidus de cultures peuvent aussi subir l'action des micro-organismes et cette décomposition contribue à l'augmentation de la matière organique du sol et par ricochet au P de la couche superficielle (Borie et al. 2000).

- Cycles de gel et dégel et phosphore du sol :

Différents résultats ont été rapportés dans la littérature sur l'effet des changements climatiques sur la fréquence des cycles de gel et de dégel dans les zones tempérées ainsi que leurs conséquences à long terme sur les pratiques agricoles (Henry 2007). Les cycles de gel et de dégel peuvent exposer de nouvelles surfaces réactives sur les particules solides et résulter en une augmentation ou une diminution de la disponibilité des éléments du sol, à l'instar du P (Ron Vaz et al. 1994). Ils peuvent aussi entraîner la rupture des structures végétales et augmenter les quantités d'éléments libérées dans la solution du sol (Bechmann et al. 2005). Pendant les périodes de gel, la stabilité des agrégats diminue (Lehrsch et al. 1991) ce qui augmente la susceptibilité du sol à la désagrégation (Allen et

Grimshaw 1962) et à l'érosion pendant le dégel et la fonte des neiges. De récentes études ont montré que l'activité microbienne se déroule à des températures au dessous de 0°C et favorise ainsi la minéralisation de la matière organique pendant la saison hivernale (Panikov et al. 2006; Clark et al. 2009). Hinman (1970) a observé que l'alternance de gel et de dégel augmente l'ammonium échangeable mais réduit le potassium échangeable. Les modifications qui surviennent dans le sol suite à l'altération des cycles de gel et de dégel affectent la dynamique du P et peuvent avoir un impact important sur la mobilisation et le transport du P soluble ou particulaire hors des parcelles cultivées. Il est donc important de comprendre les effets des cycles de gel et de dégel sur les transformations que subissent le P dans les sols agricoles, notamment ceux convertis au semis direct dans lesquels les résidus de culture sont laissés à la surface du sol après la récolte (Hinman 1970).

- Influence du labour sur l'agrégation du sol :

Dans les sols sous semis direct, on observe une accumulation de la matière organique dans les premiers centimètres du sol (Six et al., 2002). Dans les sols non labourés des climats froids, la matière organique accumulée est principalement localisée à l'intérieur des agrégats où elle bénéficie d'une protection physique (Bossuyt et al. 2005). Dans ces sols, la matière organique agit comme un ciment et favorise l'assemblage des micro-agrégats en macro agrégats (Six et al. 2002). La présence de macro-agrégats améliore la stabilité des sols non labourés face à l'érosion. Il a été démontré que la distribution des agrégats est fortement liée à celle de la matière organique dans les sols non labourés (Denef et al. 2004). De récentes études ont aussi démontré que la distribution du P dans les sols est liée à celle des agrégats (McDowell et al. 2007; McDowell et Stewart 2006; Zhang et al. 2003; Wang et al. 2001). Pierzynski et al. (1990) ont observé que les particules de sol de taille inférieure à 53 ppm présentent la plus forte concentration en P total. Maguire et al. (2008) ont observé que la concentration en P total est inversement reliée à la taille des agrégats alors que la concentration en P disponible augmente avec la taille des agrégats. Maguire et al. (2008) ont aussi démontré que contrairement au P extrait à l'aide d'une résine échangeuse d'anion, la concentration du P soluble à l'eau augmente avec la taille des agrégats. Au regard des résultats présentés dans la littérature, la question de savoir quelle est la contribution de la matière organique au P soluble à l'eau accumulé dans la couche superficielle des sols sous semis direct demeure d'actualité. L'approche d'utilisation des classes d'agrégats et le P qui leur est associé pourrait permettre de répondre à cette question (Maguire et al. 2008).

- Rotation culturale et phosphore du sol :

Les objectifs majeurs poursuivis par la rotation culturale sont la rupture du cycle des ravageurs, le contrôle des mauvaises herbes, l'amélioration des propriétés physiques et chimiques des sols. En effet, des cultures introduites dans une rotation culturale avec des systèmes racinaires différents vont explorer différemment le profil du sol et exporter de manière différentielle les éléments nutritifs. D'autre part, les résidus laissés par les cultures vont contribuer différemment à la constitution de la matière organique du sol et donc à l'apport en éléments nutritifs à travers la minéralisation (Kabengi et al. 2003). C'est le cas des rotations céréales et légumineuses qui permettent à long terme une augmentation du P dans la couche superficielle du sol (Kabengi et al. 2003). Cependant, ces observations ne sont pas toujours consistantes car Soon et Arshad (1996) et Riedel et al. (1998) ont observé une diminution du P dans les rotations céréales et légumineuses. Cette diminution du P peut être expliquée par le fait que dans ce type de rotations, les recommandations d'engrais ne tiennent compte que des exigences des céréales. Par exemple, lorsqu'il s'agit de rotations biennuelles, les engrais ne sont apportés qu'une seule année ainsi le bilan de P au terme des deux années de rotation est généralement négatif et entraîne une diminution du statut du P du sol (Riedell et al. 1998). Dans un sol volcanique du Chili, Redell et al. (2007) ont observé une accumulation du P et notamment le P labile avec la rotation avoine et blé, et une diminution du P non labile comparé à la monoculture. Basamba et al. (2007) ont observé une amélioration de la teneur en P labile dans les rotations maïs et haricots suivies d'une jachère à *Calliandra houstoniana* dans les cinq premiers centimètres d'un sol volcanique en Colombie. Villamil et al. (2006) ont observé une augmentation de la teneur en P disponible dans les rotations maïs et soja dans l'Illinois. Zheng et al. (2002) ont montré que les fractions inorganiques et organiques P-NaHCO₃ sont sensibles à la rotation des cultures alors que la fraction organique NaOH est une source de P labile dans les systèmes de rotation. Dans un Oxisols au Brésil, Lilienfein et al. (2000) ont montré que les fractions labiles de P sont les plus affectées par la rotation.

- Association céréales-légumineuses et biodisponibilité du phosphore :

Un nombre croissant d'études tendent à montrer l'avantage des cultures associées céréale-légumineuse pour l'augmentation de la biodisponibilité du P en comparaison des cultures monospécifiques (Li et al. 2007 ; Hinsinger et al. 2011a ; Latati et al. 2016 a ; Tang et al. 2014). Cette augmentation sous-entend une modification des propriétés physiques, chimiques et/ou biologiques de la rhizosphère des espèces en association, suite à leur activité racinaire. L'essentiel des études relatives aux processus rhizosphériques potentiellement impliqués dans les interactions

au sein de cultures associées se sont intéressées au rôle des enzymes de type phosphatase exsudées par les racines (Li et al. 2004), des carboxylates (Li et al. 2010) ou des microorganismes du sol (Latati et al. 2016 a). L'implication des modifications de pH induites par les racines a, quant à elle, été peu étudiée (Cu et al. 2005 ; Li et al. 2008). Dans le cas des modifications de pH induites par les racines l'acidification de la rhizosphère par la légumineuse en lien avec la fixation de N₂ est habituellement proposée comme mécanisme de facilitation. Cette hypothèse a été formulée dans le cas de sols neutres à alcalins pour lesquels des travaux récents ont mis en évidence qu'outre une diminution de pH, une augmentation de ce dernier pouvait également influencer positivement la disponibilité en P (Betencourt et al. 2012 ; Latati et al. 2014, 2016 a).

Ces processus rhizosphériques sont influencés par l'état nutritionnel des plantes, et certains sont déclenchés ou stimulés en réponse à de faibles valeurs de disponibilité en P du sol (Hinsinger 2011a). En écologie, le « stress gradient hypothesis » propose que la part relative de la compétition et de la facilitation soit influencée par l'environnement abiotique avec la prédominance d'interactions positives pour les conditions les plus stressantes pour la croissance des plantes (Bertness et Callaway 1994 ; Brooker et al. 2003). Cela a été précédemment suggéré par Li et al. (2007) rapportant une diminution du bénéfice de l'association maïs (*Zea mays* L.)-féverole (*Vicia faba* L.) en comparaison de l'association maïs (*Zea mays* L.)-blé tendre (*Triticum aestivum* L.) avec l'apport de doses croissantes de fertilisants phosphatés.

D'autres travaux, tel que Betencourt et al. (2012) montrent une augmentation significative de la disponibilité du P dans la rhizosphère des association blé dur-pois comparativement à la monoculture spécifique ainsi qu'au témoin. Ces derniers auteurs, suggèrent que cette augmentation est attribuée aux changements dans les propriétés biochimiques, chimiques et physiques de la rhizosphère. Les exsudats racines sont censés être les principaux moteurs de ces changements grâce à leur influence directe sur la disponibilité de P ou à la stimulation de l'activité microbienne. Geelhoed et al. (1999) ont prédit à l'aide d'un modèle mécaniste une telle augmentation de la concentration de P dans la rhizosphère compte tenu de l'exsudation du citrate combinée à l'activité de prise de P des racines de maïs (*Zea mays* L.). Cependant, leur travail était limité à un substrat artificiel en sable de quartz revêtu de goethite, où les ions phosphate étaient soit adsorbés sur la goethite, soit présents dans la solution, et donc facilement disponibles.

Par ailleurs, Tang et al. (1997); Yadav et Tarafdar (2001), supposent que la présence de légumineuse dans un système de culture, permettait une plus grande disponibilité du P dans la rhizosphère grâce à une exsudation racinaire plus élevée que les céréales du fait de la libération de protons en raison

de la fixation symbiotique d'azote, de la libération des carboxylates ainsi que la libération des phosphatases.

Références bibliographiques :

- Allaire G., Boyer R. 1995. La grande transformation de l'agriculture. Lecture conventionnaliste et régulationniste, Paris, INRA, 360p.
- Allen L, Sinclair T, Lemon E (1977) Radiation and microclimate relationships in multiple cropping systems.
- Allen S.E., Grimshaw H.M. 1962. Effect of low-temperature storage on the extractable nutrient ions in soils. *J. Sci. Food Agric.* 13: 525-529.
- Altieri M.A. 1992. Agroecological foundations of alternative agriculture in California. *Agric ecosyst environ.* 39: 23-53.
- Altieri M.A., Nicholls C.I. 2012. Agroecology scaling up for food sovereignty and resiliency. In : *Sustainable agriculture reviews*. Springer, Dordrecht, 2012. p. 1-29
- Alvarez C.R., Alvarez R., Grigera M.S., Lavado R.S. 1998. Associations between organic matter fractions and the active soil microbial biomass. *Soil Biol Biochem.* 30 : 767 – 773.
- Andersen M.K., Hauggaard-Nielsen H., Ambus P., Jensen E.S. 2004. Biomass production, symbiotic nitrogen fixation and inorganic N use in dual and tri-component annual intercrops. *Plant Soil* 266: 273-287.
- Angers D.A., Chenu C. 1998. Dynamics of soil aggregation and C sequestration. Dans : Lal, R., J.M. Kimble, R.A. Follett et B.A. Stewart. Eds. *Soil processes and the carbon cycle*. CRC Press. Boca Raton. FL. 14: 199 – 206.
- Anil L., Park J., Phipps R.H., Miller F.A. 1998. Temperate intercropping of cereals for forage: a review of the potential for growth and utilization with particular reference to the UK. *Grass Forage Sci.* 53: 301-317.
- Aykroyd W., Doughty J. 1982. Les graines de légumineuses dans l'alimentation. *Ann Botany.* 94:297-303.
- Baldock J.A., Nelson P. N. 2000. *Soil organic matter*. CRC press.
- Balesdent J., Arrouays D., Chenu C., Feller C. 2005. Stockage et recyclage du carbone. Chap. 10. In « *Sols et Environnement* », M.C. Girad et al. Eds, Dunod, Paris.
- Balesdent J., Chenu C., Balabane M. 2000. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil Tillage Res.* 53: 215 – 220.

- Barber S.A. 1995. Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach. 2nd Ed. John Wiley, New York, USA, 414p.
- Basamba T.A., Barrios E.E., Singh E.B.R., Rao E.I.M. 2007. Impact of planted fallows and a crop rotation on nitrogen mineralization and phosphorus and organic matter fractions on a Colombian volcanic-ash soil. *Nutr Cycl Agroecosys.* 77: 127-141.
- Bechmann M.E., Kleinman P.J.A., Sharpley A.N., Saporito L.S. 2005. Freeze-thaw effects on phosphorus loss in runoff from manured and catch-cropped soils. *J Environ Qual.* 34: 2301-2309.
- Beck M.A., Sanchez P.A. 1994. Soil phosphorus fraction dynamics during 18 years of cultivation on a Typic Paleudult. *Soil Sci Soc. Am J.* 58: 1424-143.
- Bellostas N., Hauggaard-Nielsen H., Andersen M., Jensen E. 2003. Early interference dynamics in intercrops of pea, barley and oilseed rape. *Biol Agric Hort.* 21:337-348.
- Berthet E.T., Bretagnolle V., Segrestin B. 2012. Analyzing the design process of farming practices ensuring little bustard conservation: lessons for collective landscape management. *J sustain agric.* 36: 319-336.
- Bertness, M. D., Callaway R. 1994. Positive interactions in communities. *Trends Ecol Evol.* 9:191-193.
- Bertol I., Engel F.L., Mafra A.L., Bertol O.J., Ritter S.R. 2007. Phosphorus, potassium and organic carbon concentrations in runoff water and sediments under different soil tillage systems during soybean growth. *Soil Till Res.* 94: 142-150.
- Betencourt, E., Duputel, M., Colomb, B., Desclaux, D., Hinsinger, P., 2012. Intercropping promotes the ability of durum wheat and chickpea to increase rhizosphere phosphorus availability in low P soil. *Soil Biol Biochem.* 46, 21–33.
- Blake L., Mercik S., Koerschens VI., Moskal S., Poulton P.R., Goulding K.W.T., Weigel A., Powlson D.S. 2000. Phosphorus content in soil, uptake by plants and balance in three European long-term field experiments. *Nutr Cycl Agroecosys.* 56:263-275.
- Blanco-Canqui IL., Mikha M.M., Benjamin J.G., Stone L.R., Schlegel A.J., Lyon D.J., Vigil M.F., Stahlman P.W. 2009. Regional study of no-till impacts on near-surface aggregate properties that influence soil erodibility. *Soil Sci Soc Am J.* 73:1361-1368.
- Bonde T.A., Lindberg T. 1988. Nitrogen mineralization kinetics in soil during long-term aerobic laboratory incubations. A case study. *J Environ Qual.* 17 : 414-417.
- Borie F., Rubio R., Morales A., Castillo C. 2000. Relationship between arbuscular mycorrhizal

- hyphal density and glomalin production with physical and chemical characteristics of soils under no tillage. *Rev Chil Hist Nat.* 73: 749-756.
- Bossuyt H., Six J., Hendrix P.F. 2005. Protection of soil carbon by microaggregates within earthworm casts. *Soil Biol. Biochem.* 37: 251-258.
- Bozzini A. (1988). « Origin, distribution, and production of durum wheat in the world. » Dans Fabriani G. et C. Lintas (Ed). *Durum: Chemistry and Technology*. AACCC (Minnesota), États-Unis. p. 1-16.
- Breeuwsma A., Reijerink J.G.A., Schoumans O.F. 1995. Impact of manure on accumulation and leaching of phosphate in areas of intensive livestock farming. In: Steele, K. (Ed.), *Animal Waste and the Land-Water Interface*. Lewis Publishers, Boca Raton, FL, pp. 239-249.
- Brooker R.W., Maestre F.T., Callaway R.M., Lortie C.L., Cavieres L.A., Kunstler G., Liancourt P., Tielborger K., Travis, J.M.J., Anthelme F., Armas C., Coll L., Corcket E., Delzon S., Forey E., Kikvidze Z., Olofsson J., Pugnaire F., Quiroz C.L., Saccone P., Schiffers K., Seifan M., Touzard B., Michalet R. 2003. Facilitation in plant communities: the past, the present, and the future. *J Ecol.* 96:18-34.
- Brophy L., Heichel G. 1989. Nitrogen release from roots of alfalfa and soybean grown in sand culture. *Plant Soil*, 116:77-84.
- Bruno, J.F. Stachowicz J.J., Bertness M.D. 2003. Inclusion of facilitation into ecological theory. *Trends Ecol Evol.* 18: 119-125.
- Caldwell R.M. 1987. Plant architecture and resource competition. *Ecological studies* 61:164-179.
- Carrouée, B., Schneider, A., Flénet, F., Jeuffroy, M. H., & Nemecek, T. (2012). Introduction du pois protéagineux dans des rotations à base de céréales à paille et colza: impacts sur les performances économiques et environnementales.
- Cathcart J.B. 1980. World phosphate reserves and resources. In Khasawneh et al. (ed.). *The rôle of phosphorus in agriculture*. Am Soc Agron, Madison, Wisconsin, USA Pp. 1-18.
- Cellier P., Schneider A., Thiébeau P., Vertès F. 2015. Impacts environnementaux de l'introduction de légumineuses dans les systèmes de production. In: *Les légumineuses pour des systèmes agricoles et alimentaires durables*, Schneider A., Huyghe C (Eds). Quæ. Versaille, pp 297-337.
- Cenpukdee U, Fukai S. 1992. Cassava/legume intercropping with contrasting cassava cultivars. 1. Competition between component crops under three intercropping conditions. *Field Crops Res.* 29:113-133.

- Chantigny M.H., Angers D.A., Morvan T., Pomar C. 2004. Dynamics of pig nitrogen in soil and plant determined with ^{15}N . *J Soil Sci.* 68: 637-643.
- Chapagain T., Riseman A., 2014. Barley-pea intercropping: Effects on land productivity, carbon and nitrogen transformations. *Field Crops Res.* 166, 18-25.
- CIC, Conseil International des Céréales. (2000). In: *Le blé dur en Afrique du Nord. Le bulletin Bidimensionnel .Agriculture et Agroalimentaire Canada.* Juin 2000.Vol13, N°11.
- Clarke J.M., Norvell W.A., Clarke F.R., Buckley T.W. 2002. Concentration of cadmium and other elements in the grain of near-isogenic durum lines. *Can. J. Plant Sci./Revue canadienne de phytotechnie.* 82:27-33.
- Clark K., Chantigny M.H., Angers D.A., Rochette P., Parent L.E. 2009. Nitrogen transformations in cold and frozen agricultural soils following organic amendments. *Soil Biol Biochem.* 41: 348-356.
- Condon L.M., Turner B.L., Cade-Menun B.J. 2005. Chemistry and dynamics of soil organic phosphorus. In *Agronomy monograph No. 46. Phosphorus: agriculture and the environment.* Sims, J.T. et Sharpley A.N. (Eds). Pp. 87-121.
- Cong WF., Hoffland E., Li L., Six J., Sun JH., Bao XG., Zhang F.S., Van Der Werf W. 2014. Intercropping enhances soil carbon and nitrogen. *Glob Change Biol.* 21:1715–1726.
- Connolly J., Wayne P., Murray R. (1990). Time course of plant-plant interactions in experimental mixtures of annuals: density, frequency, and nutrient effects. *Oecologia.* 82: 513-526.
- Corbridge D.E.C. 2000. *Phosphorus 2000.* Chem biogeochem tech. Elsevier, New York.
- Corre-Hellou G., Crozat Y. 2004. N_2 fixation and N supply in organic pea (*Pisum sativum* L.) cropping systems as affected by weeds and pea weevil (*Sitona lineatus* L.). *Eur J Agron.* 22:449-458.
- Corre-Hellou G. 2005. Acquisition de l'azote dans des associations pois-orge (*Pisum sativum* L. - *Hordeum vulgare* L.) en relation avec le fonctionnement du peuplement. Thèse de doctorat en sciences agronomiques de l'école doctorale d'Angers.
- Corre-Hellou G., Bedoussac L., Bousseau D., Chaigne G., Chataigner C., Celette F., Foissy D. 2013. Associations céréale-légumineuse multi-services. *Innovations Agronomiques.* 30:41-57.
- Cox G. W., Atkins M.D. 1979. *Agric ecol. An analysis of world food production systems.* WH Freeman and Company.
- Crookston R., Treharne K., Ludford P., Ozbun J. 1975. Response of beans to shading. *Crop Sci.* 15:412-416.

- Crozat Y., Aveline A., Coste F., Gillet J., Domenach A. 1994. Yield performance and seed production pattern of field-grown pea and soybean in relation to N nutrition. *Eur J Agron.* 3:135-144.
- Cu S.T.T., Hutson J., Schuller K.A. 2005. Mixed culture of wheat (*Triticum aestivum* L.) with white lupin (*Lupinus albus* L.) improves the growth and phosphorus nutrition of the wheat. *Plant Soil.* 272:143–151.
- Cudney D., Jordan L., Hall A. 1991. Effect of wild oat (*Avena fatua*) infestations on light interception and growth rate of wheat (*Triticum aestivum*). *Weed Sci.* 39:175-179.
- David C., Jeuffroy M.H., Henning J., Meynard J.M. 2005. Yield variation in organic winter wheat: a diagnostic study in the Southeast of France. *Agron Sustain Dev.* 25: 213-223.
- Denef K., Six J., Merckx R., Paustian K. 2004. Carbon sequestration in microaggregates of no tillage soils with different clay mineralogy. *Soil Sci Soc Am. J.* 68: 1935-1944.
- Drevon JJ., Alkama N., Araujo A., Beebe S., Blair M.W., Hamza H., Jaillard B., Lopez A., Martinez-Romero E., Rodino P., et al. 2011. Nodular diagnosis for ecological engineering of the symbiotic nitrogen fixation with legumes. *Procedia Environ Sci.* 9:40–46.
- Duc G., Bao, S., Baum M. 2010. Diversity maintenance and use of *Vicia faba* L. genetic resources. *Field Crops Res.* 115:270-278.
- Duchene O., Vian J.F., Celette F. 2017. Intercropping with legume for agro-ecological cropping systems: Complementarity and facilitation processes and the importance of soil microorganisms. A review. *Agron Ecosyst Environ.* 240:148-161.
- Eghball B., Power J.F., Gilley J.E., Doran J.W. 1997. Nutrient, carbon, and mass loss of beef cattle feedlot manure during composting. *J Environ Qual.* 26 : 189 - 193.
- Evans P. M., Cameron N. L. 1998. Performance of pasture legumes on three contrasting soil types in western Victoria. In *Proceedings of the 9th Australian agronomy conference*. (Eds DL Michalk, JE Pratley), pp. 174-177.
- FAO 2016. La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture. *World Resources Report.* 60, 138.
- Feillet P. 2000. Le grain de blé : composition et utilisation. INRA. Paris. 308 pp.
- Foy R.H. 2005. The return of the phosphorus paradigm: Agricultural phosphorus and eutrophication. In *Agronomy monograph No. 46. Phosphorus: agriculture and the environment.* Sims, J.T. et Sharpley A.N. (Eds). Pp. 911-940.
- Fujita K., Ofosubudu K.G., Ogata S. 1992. Biological nitrogen fixation in mixed legume-cereal

- cropping systems. *Plant Soil*. 141:155-175.
- Gagnon B., Ziadi N., 2010. Nitrogen use in grain com as affected by type of mineral N fertilizer at side dress. *Agron J*. 102: 1014-1022.
- Gallet A., Flisch R., Ryser J.P., Frossard E., Sinaj S. 2003. Effects of phosphates fertilization on crop yield and soil phosphorus status. *J Plant Nutr Soil Sci*. 166:568-578.
- Gastal F., Belanger G., Lemaire G. 1992. A model of leaf extension rate of tall fescue in response to nitrogen and temperature. *Ann Bot*. 70:437-442.
- Gastal F., Lemaire G. (1988) Study of a tall fescue sward grown under nitrogen deficiency conditions.
- Geelhoed J.S., van Riemsdijk W.H., Findenegg G.R. 1999. Simulation of the effect of citrate exudation from roots on the plant availability of phosphate adsorbed on goethite. *Eur J Soil Sci*. 50:379-390.
- Ghanbari-Bonjar A., Lee H.C. 2003. Intercropped wheat (*Triticum aestivum* L.) and bean (*Vicia faba* L.) as a whole-crop forage: effect of harvest time on forage yield and quality. *Grass Forage Sci*. 58: 28-36.
- GIEC. 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*, Contribution of Working Group
- 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.
- Glenn Lennox. 2003. L'importance du blé dans le monde. Sur le site: (<http://pst.chez-alice.fr/svtiufm/ble.htm>).
- Golchin A., Oades J.M., Skjemstad J.O., Clarke P. 1994. Soil structure and carbon cycling. *Aust J Sci Res*. 32: 1043 – 68.
- Goldberg D.E. 1990. Components of resource competition in plant communities. *Perspec plant comp*. 33: 27-49.
- Goodlass G., Halberg N., Verschuur G. 2003. Input output accounting systems in the European community/an appraisal of their usefulness in raising awareness of environmental problems. *Eur. J. Agron*. 20: 17-24.
- Gosse G., Varlet-Grancher C., Bonhomme R., Chartier M. 1986. Maximum dry matter production and solar radiation intercepted by a canopy. *Agron*. 6:47-56.
- Grant C.A., Peterson G.A., Campbell C.A. 2005. Nutrient considerations for diversified cropping systems in the northern great plains. *Agron J*. 94: 186-198.

- Griffon M. 2006. Nourrir la planète. Odile Jacob.
- Griffon M. 2007. Pour des agricultures écologiquement intensives, des territoires à haute valeur environnementale et de nouvelles politiques agricoles: leçon inaugurale 2007.
- Guo F., Yost R., Hue N., Evensen C, Silva J. 2000. Changes in phosphorus fractions in soils under intensive plants growth. *Soil Sci Soc Am. J.* 64: 1681-1689.
- Hamblin A., Tennant D. 1987. Root length density and water uptake in cereals and grain legumes: how well are they correlated. *Aust J Agric Res.* 38:513-527.
- Hang A., McCloud D., Boote K., Duncan W. 1984. Shade effects on growth, partitioning, and yield components of peanuts. *Crop Sci.* 24:109-115.
- Hargrove W.L. 1988. Evaluation of ammonia volatilization in the field. *J Prod Agric.* 1: 104-111.
- Hauggaard-Nielsen H., Ambus P., Jensen E.S. 2001a. Temporal and spatial distribution of roots and competition for nitrogen in pea-barley intercrops a field study employing P-32 technique. *Plant Soil* 236:63-74.
- Hauggaard-Nielsen H., Ambus P., Jensen E.S. 2001b. Interspecific competition, N use and interference with weeds in pea-barley intercropping. *Field Crops Res.* 70:101-109.
- Hauggaard-Nielsen H., Ambus P., Jensen E.S. 2003. The comparison of nitrogen use and leaching in sole cropped versus intercropped pea and barley. *Nutr Cycl Agroecosyst.* 65:289-300.
- Haygarth P.M. and Sharpley A.N. 2000. Terminology for phosphorus transfer. *J Environ Qual.* 29:10-15.
- Haygarth P.M., Harrison A.F., Turner B.L. 2018. On the history and future of soil organic phosphorus research: a critique across three generations. *Eur J Soil Sci.* 69: 84-94.
- Heckrath G., Brookes P.C., Poulton P.R., Goulding K.W.T. 1995. Phosphorus leaching from soils containing different phosphorus concentrations in the broadbalk experiment. *J Environ Qual.* 24: 904-910.
- Henry H.A.L. 2007. Review. Soil freeze-thaw cycle experiments: Trends, methodological weaknesses and suggested improvements. *Soil Biol Biochem.* 39: 977-986.
- Henry Y., Bouyser J. 2000. L'origine du blé. Pour la Science. Hors série. 26:60-62.
- Hilbruner M.W., Keller P. 2007. National Fire Plan Research and Development 2004-2005 accomplishment report. General Technical Report RMRS-GTR-200. Fort Collins, CO: USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 73 p., 200.
- Hinman W.C. 1970. Effects of freezing and thawing on some chemical properties of three soils. *Can J Soil Sci.* 50: 179-182.

- Hinsinger P., Gobran G. R., Gregory P. J., Wenzel W. W. 2005. Rhizosphere geometry and heterogeneity arising from root-mediated physical and chemical processes. *New Phytologist*. 168:293-303.
- Hinsinger P., Brauman A., Devau N., Gérard F., Jourdan C., Laclau J-P., Le Cadre E., Jaillard B. 2011a. Acquisition of phosphorus and other poorly mobile nutrients by roots. Where do plant nutrition models fail? *Plant Soil* 348:203-218.
- Hinsinger P., Brauman A., Devau N., Gerard F., Jourdan C., Laclau J.P., Le Cadre E., Jaillard B., Plassard C. 2011b. Acquisition of phosphorus and other poorly mobile nutrients by roots. Where do plant nutrition models fail? *Plant Soil* 348:29-61.
- Holford L.C.R., Patrick J.R. 1979. Effects of reduction and pH changes on phosphate sorption and mobility in an acid soil. *Soil Sci Soc Am J*. 43: 292-297.
- Houghton R.A. 2007. Balancing the global carbon budget. *Annu. Rev. Earth Planet Sci*. 35:313-347.
- Jackson W., Piper J. 1989. The necessary marriage between ecology and agriculture. *Ecology*. 70:1591-1593.
- Jégo G., Martinez M., Antigüedad I., Launay M., Sanchez-Pérez J.M., Justes E. 2008. Evaluation of the impact of various agricultural practices on nitrate leaching under the root zone of potato and sugar beet using the STICS soil-crop model. *Science of the Total Environment*. 394: 207-221.
- Jensen E.S. 1996a. Grain yield, symbiotic N₂ fixation and interspecific competition for inorganic N in pea-barley intercrops. *Plant Soil*. 182, 25-38.
- 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.
- Jeuffroy M.H., Baranger E., Carrouée B., Chezelles E.D., Gosme M., Hénault C., Cellier, P. 2013. Nitrous oxide emissions from crop rotations including wheat, oilseed rape and dry peas. *Biogeosci*. 10: 1787-1797.
- Johansen A., Jensen E. 1996. Transfer of N and P from intact or decomposing roots of pea to barley interconnected by an arbuscular mycorrhizal fungus. *Soil Biol Biochem*. 28:73-81.
- Kabengi N.J., Zurayk R.A., Baalbaki R.Z., Ryan J. 2003. Phosphorus dynamics and characterization under long-term rotation trial. *Comm. Soil Sci Plan*. 34: 375-392.
- Kaci G., Blavet D., Benlahrech S., Kouakoua E., Couderc P., Deleporte P., Desclaux D., Latati M.,

- Pansu M., Drevon J.J., Ounane, S. M. 2018. The effect of intercropping on the efficiency of faba bean–rhizobial symbiosis and durum wheat soil-nitrogen acquisition in a Mediterranean agroecosystem. *Plant Soil Envi.* 64: 138-146.
- Khan MS., Zaidi A., Musarrat J. 2010. *Microbes for Legume Improvement*. Ed. Springer. Wien New York, Printed in Germany, 535p.
- Kovar J.L., Barber S.A. 1988. Phosphorus supply characteristics of 33 soils as influenced by seven rates of phosphorus addition. *Soil Sci Soc. Am. J.* 52: 160-165.
- Kuo S. 1996. Phosphorus. In *Methods of soil analysis. Part 3, Chemical Methods*. Sparks, D.L. (eds). SSSA book series 5. pp. 869-919.
- Ladd J. N. 1978. Origin and range of enzyme in soil. *Soil Enzyme*.
- Ladd J.N., Jocteur-Monrozier L., Amato M. 1992. Carbon turnover and nitrogen transformations in an alfisol and vertisol amended with [U-14C] glucose and [15N] ammonium sulfate. *Soil Biol Biochem.* 24: 359-371.
- 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.* 1:1–7.
- Latati M., Blavet D., Alkama N., Laoufi H., Drevon J.J., Gérard F., Pansu M., Ounane S.M. 2014. The intercropping cowpea–maize improves soil phosphorus availability and maize yields in an alkaline soil. *Plant Soil.* 85:181–191.
- Latati M., Bargaz A., Belarbi B., Lazali M., Benlahrech S., Tellah S., Kaci G., Drevon J.J., Ounane S.M. 2016a. 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.
- Latati M., Benlahrech S., Lazali M.; Tellah S., Kaci G., Takouachet R., Alkama N., Hamdani F.Z., Hafnaoui E.A., Belarbi B., Ounane G., Ounane S.M. 2016b. Intercropping promotes the ability of legume and cereal to facilitate phosphorus and nitrogen acquisition through root-induced processes, in : Goyal AK, editor, *Grain legumes*. Rijeka: INTECH Open Access Publisher; p. 127-139.
- Lehrsch G.A. Sojka R.E., Carter D.L., Jolley P.M. 1991. Freezing effects on aggregate stability affected by texture, mineralogy, and organic matter. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55: 1401-1406.
- Lemaire G., Gastal F. 1997. N uptake and distribution in plant canopies. In: *Diagnosis of the nitrogen status in crops*. Lemaire G, Springer. pp 3-43.
- Li H., Shen J., Zhang F., Clairotte M., Drevon J.J., Le Cadre E., Hinsinger P. 2008. Dynamics of

- phosphorus fractions in the rhizosphere of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and durum wheat (*Triticum turgidum durum* L.) grown in monocropping and intercropping systems. *Plant Soil*. 312:139-150.
- Li H., Shen J., Zhang F., Marschner P., Cawthray G., Rengel Z. 2010. Phosphorus uptake and rhizosphere properties of intercropped and monocropped maize, faba bean, and white lupin in acidic soil. *Biolo Fert Soils*. 46:79-91.
- 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.
- Li S.M., Li L., Zhang F., Tang C. 2004. Acid phosphatase role in chickpea/maize intercropping
- Lilienfein J., Wilcke W., Ayarza M.A., Vilela L., do Carmo Lima S., Zech, W. 2000. Chemical fractionation of phosphorus, sulphur, and molybdenum in Brazilian savannah Oxisols under different land use. *Geoderma* 96: 31-46.
- Loiseau P., Decau M.L. 1995. Mineralization and organization of nitrogen, in prairiaux soils estimates at harvest from data of shoots labelled with ^{15}N . In : *Utilisation des isotopes stables pour l'étude du fonctionnement des plantes*, INRA Editions, Paris, Les colloques de l'INRA, pp. 299-314.
- Loomis R.S, Williams W.A. 1963. Maguire, R.O., Mullins, G.L., Brosius, M. 2008. Evaluating long-term nitrogen-versus phosphorus-based nutrient management of poultry litter. *J Environ Qual*. 37: 1810-1816.
- Maguire R.O., Mullins G.L., Brosius M. 2008. Evaluating long-term nitrogen-versus phosphorus-based nutrient management of poultry litter. *J Environ Qual*. 37: 1810-1816.
- Marshall B., Willey R. 1983. Radiation interception and growth in an intercrop of pearl millet/groundnut. *Field Crops Res*. 7:141-160.
- Mattingly G.E.G. 1975. Labile phosphate in soils. *Soil Sc*. 119 (5): 369-375.
- Mayer J., Buegger F., Jensen E.S., Schloter M., Heß J. 2003. Residual nitrogen contribution from grain legumes to succeeding wheat and rape and related microbial process. *Plant Soil*, 255: 541-554.
- McDowell R.W., Stewart T.I. 2006. The phosphorus composition of contrasting soils in pastoral, native and forest management in Otago, New Zealand: Sequential extraction and ^{31}P NMR. *Geoderma*. 130: 176-189.

- McDowell R.W., Scott J.T., Stewart I., Condron L.M. 2007. Influence of aggregate size on phosphorus changes in a soil cultivated intermittently: analysis by ³¹P nuclear magnetic resonance. *Biol Fertil Soils*. 43: 409-415.
- Meals DW., Cassell E.A., Hughell D., Wood L., Jokela W.E., Parsons R. 2008. Dynamic spatially explicit mass-balance modeling for targeted watershed phosphorus management I. Model development. *Agr Ecosys Environ*. 127: 189-200.
- Mengel K., Kirkby E.A. 2000. Nitrogeno. In : "Principios de nutricion vegetal. Chapitre 7:305-338. I.P.I. Editeur. Bern, Suisse.
- Ministère de l'Agriculture du Développement Rural et de la Pêche. 2016. Série B.
- Morel C, 2002. Caractérisation de la phytodisponibilité du P du sol par la modélisation du transfert des ions phosphates entre le sol et la solution. Habilitation à diriger des Recherches. INPL-ENSA-IA Nancy. 80 pp.
- Muukkonen P., Hartikainen IL, Lahti K., Särkelä A., Puustinen M., Alakukku L. 2007. Influence of no-tillage on the distribution and lability of phosphorus in Finnish clay soils. *Agr Ecosyst Environ*. 120: 299-306.
- 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.
- Neugschwandtner R.W., Kaul H.P. 2015. Nitrogen uptake, use and utilization efficiency by oat-pea intercrops. *Field Crops Res*. 179: 113-119.
- Nicolardot B., Duthion C., Chèneby D. 1996. Decomposition of crop residues: a rather slow mineralization. *Grain legumes*. 14: 18-19.
- Nicolardot B., Recous S., Mary B. 2001. Simulation of C and N mineralisation during crop residue decomposition: a simple dynamic model based on the C:N ratio of the residues. *Plant and Soil*. 228: 83-103.
- O'Halloran LP., Cade-Menun B.J. 2007. Total and organic phosphorus. In *Soil Sampling and Methods of analysis*. Carter, M.R., and Gregorich, E.G., (2nd eds). Pp.265-291.
- Oelbermann M., Regehr A., Echarte L. 2015. Changes in soil characteristics after six seasons of cereal-legume intercropping in the Southern Pampa. *Geoderma Reg*. 4:100-107.
- Oenema O., Kros, H., de Vries W. 2003. Approaches and uncertainties in nutrient budgets: implications for nutrient management and environmental policies. *Eur J Agron*. 20: 3-16.
- Ofori F., Stern W.R. 1987. Cereal – legume intercropping systems. *Adv Agron*. 41:41-90.

- Ohyama T. (2017): The role of legume-rhizobium symbiosis in sustainable agriculture. In: Sulieman S., Phan Tran L.S. (eds.): *Legume Nitrogen Fixation in Soils with Low Phosphorus Availability*. Cham, Springer, pp. 1-20.
- Palma R.M., Saubidet M.I., Rímolo M., Utsumi J. 1998. Nitrogen losses by volatilization in a corn crop with two tillage systems. *Communications in Soil Science And Plant Analysis*. 29:19-20.
- Panikov N.S., Flanagan P.W., Oechel W.C, Mastepanov M.A., Christensen T.R. 2006. Microbial activity in soils frozen to below -39° C. *Soil Biol Biochem*. 38:785-794.
- Pansu M., Sarmiento M.A., Rujano M., Ablan D., Acevedo Bottner P. 2010. Modeling Organic transformations by Micro-Organisms of Soils in six contrasting ecosystems: validation of the MOMOS model. *Global Biogeochemical Cycles*. 24:15-25.
- Paynel F., Murray P., Cliquet J. 2001. Root exudates: a pathway for short-term N transfer from clover and ryegrass. *Plant Soil*, 229:235-243.
- Pierzynski G.M., McDowell R.W., Sims J.T. 2005. Chemistry, cycling, and potential movement of inorganic phosphorus in soils. In *Agronomy monograph No. 46. Phosphorus: agriculture and the environment*. Sims, J.T., et Sharpley A.N. (Eds). Pp. 53-86.
- Post W.M., Kwon K.C. 2000. Soil Carbon Sequestration and Land-Use Change: Processes and Potential. *Global Change Biology*. 6: 317-328.
- Pousset J., Bureau J.M. 2014. *Assolements et rotations: Choisir, répartir, ordonner et associer les cultures*. Paris: Editions France Agricole, 359p.
- Raich J.W., Schlesinger W.H. 1992. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate, *Tellus Series B-Chemical And Physical Meteorology*. 44: 81-99.
- Ramos C., Kücke M. 1999. Revisión crítica de los métodos de medida de la lixiviación de nitrato en suelos agrícolas. Dans : *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo*. Eds. R. Muñoz-Carpena, A. Ritter, C. Tascón. ICIA: Tenerife.
- Redding M.R., Shatte T., Bell K. 2006. Soil sorption/desorption of phosphorus from piggy effluent compared with inorganic sources. *Eur J Soil Sci*. 57: 134-146.
- Redell Y.D., Rubio R., Rouanet J.L., Borie F. 2007. Phosphorus bioavailability affected by tillage and crop rotation on a Chilean volcanic derived Ultisol. *Geoderma*. 139: 388-396.
- Reisenauer H. 1964. Mineral nutrients in soil solution: In P.L., Altman and D.S. Dittmer. Eds. *Environmental Biology*. Fed Am Soc Exp Biol, Bethesda, MD. Pp. 507-508.
- 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.
- Riedell W.E., Schumacher T.E., Clay S.A., Ellsbury M.M., Pravecek M., Evenson P.D. 1998. Corn and soil fertility responses to crop rotation with low, medium, or high inputs. *Crop Sci.* 38: 427-133.
- Rimski-Korsakov H., Gutiérrez Boem F.H., Scheiner J.D, Equiza J., Lavado R.S. 2000. Nitratos residuales en soja. Efecto de dosis y momento de fertilización. *Actas International Soil Conservation Organization (ISCO). 110 Conferencia Internacional. Buenos Aires, II, 151.*
- Robert M. 1996. *Le sol. Interface dans l'environnement, ressource pour le développement.* Masson. Ed. Paris. 244.
- Robert M. 2002. Rapport sur les ressources en sols du monde N° 96. La séquestration du carbone dans le sol pour une meilleure gestion de terres. Rapport INRA-FAO Rome. 62.
- Rochette P., Janzen H. H. 2005. Towards a revised coefficient for estimating N₂O emissions from legumes. *Nutr Cycl Agroecosys.* 73:171-179.
- Rodriguez M.B., Giambiagi N. 1995. Denitrification in tillage and no tillage pampean soils: Relationships among soil water, available carbon, and nitrate and nitrous oxide production. *Comm. Soil Sci Plant Anal.* 26: 3205-3220.
- Ron Vaz M.D., Edwards A.C, Shand C.A., Cresser M.S. 1994. Changes in the chemistry of soil solution and acetic-acid extractable P following different types of freeze/thaw episodes. *Eur J Soil Sci.* 45: 353-359.
- Saavedra C., Velasco J., Pajuelo, P., Perea F., Delgado A. 2007. Effect of tillage on phosphorus release potential in a Spanish Vertisol. *Soil Sci Soc Am. J.* 71: 56-63.
- Scalise A., Tortorella, D., Aurelio Pristeri., Petrov B., Gelsomino A., Lindstrom K., Monti M., 2015. Legume-barley intercropping stimulates soil N supply and crop yield in the succeeding durum wheat in a rotation under rained conditions. *Soil Biol Biochem.* 89, 1-12.
- Schimel D.S. 1995. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle, *Global Change Biology* 1, 77-91.
- Scott J.T., Cotner J.B., LaPara T.M. 2012. Variable stoichiometry and homeostatic regulation of bacterial biomass elemental composition. *Frontiers Microbiol.* 3:1-8.
- Selles F., Kochhann R.A., Denardin J.E., Zentner R.P., Faganello A. 1997. Distribution of phosphorus fractions in a Brazilian Oxisol under different tillage systems. *Soil Till Res.* 44: 23-34.
- Sharpley A.N., Smith S.J. 1991. Effect of cover crops on surface water quality. In: *Cover crops for*

- clean water. Soil and Water Conservation Society, Hargrove W. L. (ed.), Ankeny. IA. Pp. 41-50
- Simard R.R., Beauchemin S., Haygarth P.M. 2000. Potential for preferential pathways of phosphorus transport. *J Environ Qual.* 29: 97-105.
- Sinclair T.R. Valdez V. 2000. Physiological traits for crop improvement in low-nutrient environment: The crop physiologists view. In "food security in nutrient-stressed environment: Exploiting plants genetic capabilities" Adu-Gyamfi M. (Ed.), Pp.19-21.
- Sinoquet H., Caldwell R.M. 1995. Estimation of light capture and partitioning in intercropping systems. In *Ecophysiology of tropical intercropping*. INRA, Paris, pp.79-97.
- Sivakumar M.V., Virmani S. 1980. Growth and resource use of maize, pigeonpea and maize/pigeonpea intercrop in an operational research watershed. *Exp Agric.* 16:377-386.
- Six J., Conant R.T. Paul E.A., Paustian K. 2002. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils *J Plant Soil.* 241 : 155-176.
- Smith S.E., Read D.J., 1997. *Mycorrhizal symbiosis*. 2nd ed. Academic Press, San Diego, C.A.
- Sommer S.G., Hutchings N.J. 2001. Ammonia emission from field applied manure and its reduction. *Eur J Agron.* 15: 1–15
- Soon Y.K., Arshad M.A. 1996. Effects of cropping systems on nitrogen, phosphorus and potassium forms and soil organic carbon in a Gray Luvisol. *Biol Fertil Soils.* 22:184-190.
- Spitters C., Aerts R. 1983. Simulation of competition for light and water in crop-weed associations. *Aspects Appl Biol.* 4:467-483.
- Stern W.R. 1993. Nitrogen fixation and transfer in intercrop systems. *Field crops research.* 34: 335-356.
- Stirling C., Williams J., Black C., Ong C. 1990. The effect of timing of shade on development, dry matter production and light-use efficiency in groundnut (*Arachis hypogaea* L.) under field conditions. *Aust J. Agric Res.* 41:633-644.
- Taboada M.A., F.G. Micucci D.J., Cosentino R.S. Lavado. 1998. Comparison of compaction induced by conventional and zero tillage in two soils of the Rolling Pampa of Argentina. *Soil Till Res.* 49 : 57 – 63.
- Tang C., Barton L., Rapheal C. 1997. Pasture legume species differ in their capacity to acidify a low-buffer soil. *Aust J Agric Res.* 49:53-58.
- Tang X., Bernard L., Brauman A., Daufresne T., Deleporte P., Desclaux D., Souche S., Placella S.A., Hinsinger P. 2014. Increase in microbial biomass and phosphorus availability in the

- rhizosphere of intercropped cereal and legumes under field conditions. *Soil Biol Biochem.* 75: 86-93.
- Tofinga M., Paolini R., Snaydon R. 1993. A study of root and shoot interactions between cereals and peas in mixtures. *J Agric Sci.* 120:13-24.
- Tokura A., Furtini Neto A.E., Curi N., Faquin V., Hissao Kurihara C., Alovise A.A. 2002. Formas de fósforo em solo sob plantio direto em razão da profundidade e tempo de cultivo. *Pesq. Agropec. Bras.*, 37; 10: 1467-1476.
- Tricot F., Crozat Y., Pellerin S. 1997. Root system growth and nodule establishment on pea (*Pisum sativum* L.). *J Exp Bot.* 48:1935-1941.
- Tsubo M., Walker S., Mukhala E. 2001. Comparisons of radiation use efficiency of mono-/intercropping systems with different row orientations. *Field Crops Res.* 71:17-29.
- Tsubo M., Walker S. 2004. Shade effects on *Phaseolus vulgaris* L. intercropped with *Zea mays* L. under well-watered conditions. *J Agron Crop Sci.* 190:168-176.
- Tunney H., Csatho P., Ehlert P. 2003. Approaches to calculating P balance at the field scale in Europe. *J. Plant Nutr Soil Sci.* 166: 438-446.
- Turner B.L., Frossard E., Oberson A. 2006. Enhancing phosphorus availability in low- fertility soils. In *Biological approaches to sustainable soil systems*. N. Uphoff, Eds. CRC Press. Pp. 191-205.
- U.S. Geological Survey. 2010. Mineral commodities summaries. (Online). Available at <http://minerals.usgs.gov/mineral/pubs/mcs/>
- Van Riemsdijk W.H., Boumans L.J.M., de Haan F.A.M. 1984. Phosphate sorption by soils. I. A diffusion precipitation model for the reaction of phosphate with metaloxides in soil. *Soil Sci Soc Am J.* 45: 261-266.
- Vandermeer J. 1989. *The ecology of intercropping*, Cambridge Univ. Press. Cambridge. UK.
- Vandermeer J., van Noordwijk M., Anderson J., Ong C., Perfecto I. 1998. Global change and multi-species agroecosystems: concepts and issues. *Agric, Ecosys Env.* 67:1-22.
- Vavilov N. I. 1951: *The origin, variation, immunity and breeding.*
- Verma R.K., Yadav A., Rahman L., Kalra A., Patra D.D. 2014. Influence the status of soil chemical and biological properties by intercropping. *Int J Recycl Org Waste Agricult.* 3:46-52.
- Villamil M.B., Bouero G.A., Darmody R.G., Simmons F.W., Bullock D.G. 2006. No-till corn/soybean systems including winter cover crops: effects on soil properties. *Soil Sci Soc. Am. J.* 70: 1936-1944.

- Voisin A.S., Salon C., Munier-Jolain N.G., Ney B. 2002. Quantitative effects of soil nitrate, growth potential and phenology on symbiotic nitrogen fixation of pea (*Pisum sativum* L.). *Plant Soil*. 243:31-42.
- Wacquant J., Ouknider M., Jacquard P. 1989. Evidence for a periodic excretion of nitrogen by roots of grass-legume associations. *Plant Soil*, 116:57-68.
- Wang Z.G., Bao X.G., Li W.F., Jin X., Zhao J.H., Sun J.H., Christie P., Li L. 2015. Intercropping maintains soil fertility in terms of chemical properties and enzyme activities on a timescale of one decade. *Plant Soil*, 391: 265-282.
- Wang X., Yost R.S., Linqvist B.A. 2001. Soil aggregates size affects phosphorus desorption from highly weathered soils and plant growth. *Soil Sci Soc Am J*. 65: 139-146.
- Watiki J., Fukai S., Banda J., Keating B. 1993. Radiation interception and growth of maize/cowpea intercrop as affected by maize plant density and cowpea cultivar. *Field Crops Res*. 35:123-133.
- Willey R. 1979a. Intercropping: its importance and research needs. 1. Competition and yield advantages. *Field Crop Abstr*. 32:1-10.
- Xiao Y., Li L., Zhang F. 2004. Effect of root contact on interspecific competition and N transfer between wheat and fababean using direct and indirect ^{15}N techniques. *Plant Soil*, 262: 45-54.
- Yadav R.S., Tarafdar J.C. 2001. Influence of organic and inorganic phosphorus supply on the maximum secretion of acid phosphatase by plants. *Biol Fert Soils* 34:140–143.
- 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.
- Zheng Z., Simard R.R., Lafond J., Parent L.E. 2002. Pathways of soil phosphorus transformations after 8 years of cultivation under contrasting cropping practices. *Soil Sci Soc Am J*. 66: 999-1007.

I. Objectif de recherche :

Il est admis depuis longtemps que les légumineuses sont considérées comme des espèces clés dans le fonctionnement des écosystèmes (Drevon et al. 2011; Duchen et al. 2017 ; Malézieux et al. 2009; Scalise et al. 2015). Leur place dans le système intercalaire s'explique en grande partie par leur capacité de fixation de l'azote (N) et de faciliter l'assimilation du phosphore (P). Ces bénéfices écologiques sont très précieux en particulier dans les systèmes de culture déficitaires en N et P. (Bedoussac et al. 2015; Hauggaard-Nielsen et Al. 2009).

Plusieurs études rapportent l'effet positif du système légumineuses-céréales sur la durabilité de la production agricole grâce à la facilitation de l'utilisation des ressources en éléments nutritifs, à la restauration de la fertilité des sols et à l'augmentation des rendements (Latati et al. 2016 a ; Tang et al. 2014 ; Kaci et al. 2018). Cependant, les interactions entre les racines intercalées et les microorganismes du sol sont encore largement inexplorées et très peu de données sont disponibles sur les processus de facilitation (Philippot et al. 2013).

L'intercropping favorise le développement de différents types de racines et modifie la répartition et l'architecture globale des racines, ainsi que les processus d'exsudation dans la rhizosphère (Bargaz et al. 2015a; Betencourt et al. 2012; Li et al. 2016). Ces changements favorisent l'interaction entre les plantes et les microorganismes, permettant ainsi une symbiose plus efficace dans le prélèvement des éléments nutritifs.

L'objectif majeur de cette thèse est de comprendre l'influence de l'introduction d'une légumineuse dans un système de culture céréalière soit en rotation ou en association, en partant de l'hypothèse que les exsudats racinaires des légumineuses stimuleraient l'activité microbienne de la rhizosphère qui se traduit par une meilleure assimilation des nutriments et un meilleur développement des cultures.

Cet objectif général a été décliné en plusieurs sous-objectifs :

- Quelle serait l'influence des associations et rotations céréale-légumineuse sur i) la dynamique de séquestration du C, ii) la fixation symbiotique de N et iii) la biodisponibilité du P.

- Quelle seraient les mécanismes biologiques impliqués dans le transfert du carbone, de l'azote et du phosphore entre les divers pools du système complexe sol-plante-microorganisme-atmosphère.

- Ces légumineuses fixatrices peuvent-elles constituer des sources suffisantes d'azote pour les céréales en association ou rotation? Dans quelle mesure le phosphore limite-t-il la fixation d'azote ?

- A quelle échelle de temps ces sources N et P sont-elles disponibles ? Comment assurent-elles la fertilité et la durabilité des systèmes ?

L'autre objectif est de trouver des systèmes de production qui augmentent la productivité agricole, tout en respectant les normes de qualité de l'environnement, pour répondre à l'augmentation de la demande alimentaire. C'est un défi, compte tenu des estimations, prévoit d'ici 2030, une augmentation de la demande annuelle en céréales d'un milliard de tonnes. Des événements imprévisibles, comme par exemple une flambée des prix pétroliers, des sursauts de croissance ou des crises spectaculaires pourraient, bien sûr, modifier la demande. L'utilisation de blé par habitant dans les pays en développement, essentiellement pour l'alimentation humaine, ne cesse d'augmenter, et la plupart de ces pays sont de plus en plus dépendants des importations. Les importations nettes de blé devaient passer de 72 millions de tonnes par an en 1997-99 à 160 millions en 2030.

II. Méthodologie de recherche :

Les paragraphes suivants décrivent la stratégie globale qui a été employée pour répondre à nos questions de recherche. Ces informations permettent d'explicitier la démarche globale choisie et viennent en complément des sections « matériel et méthodes » indiquées dans chaque chapitre.

II.1. Analyse des interactions entre espèces/choix des ratios de densité :

L'évaluation du fonctionnement des agroécosystèmes plurispécifiques comme, dans notre cas, les cultures associées céréale-légumineuse consiste en la comparaison de leurs performances à celles des cultures monospécifiques des espèces correspondantes. Les interactions entre espèces (i.e. interactions interspécifiques) sont ainsi évaluées en références aux interactions entre individus d'une même espèce (i.e. interactions intraspécifiques). Différents designs expérimentaux ont été définis afin de répondre à des objectifs variant de l'optimisation de la productivité des cultures associées à l'analyse des interactions et de leurs mécanismes. Il est ainsi possible de citer trois grands types de designs expérimentaux, chacun présentant des variations : (i) les designs de type substitutif (« substitutive design » ou « remplacement design »), (ii) les designs de type additif (« additive design ») et (iii) ceux de type « série additive ».

II.2. Le dispositif de type substitutif :

Le design substitutif « simple/strict » est couramment utilisé en écologie pour déterminer les mécanismes d'interaction entre plantes. Il consiste à conserver une densité totale constante entre la culture associée et les cultures monospécifiques correspondantes. En association, la densité de chaque espèce correspond à une proportion de celle en culture monospécifique dont la somme est

égale à 1. Ainsi dans le cas d'une culture associée comprenant 2 espèces, la figure a représente le cas où la densité de chacune, en association, correspond à la moitié de celle en culture monospécifique.

Le design substitutif « proportionnel » et comme précédemment les densités des espèces en association correspondent à une proportion de celles en culture monospécifique et leur somme est égale à 1. Les densités totales peuvent cependant différer entre chaque culture monospécifique. Celles des cultures monospécifiques correspondent généralement aux densités permettant d'optimiser les performances dans ces conditions. Dans le cas d'association de deux espèces, leur densité respective en association correspond souvent à la moitié de celle en culture monospécifique.

II.3. Les dispositifs de type additif :

En association, la densité de chaque espèce est la même que celle en culture monospécifique. Le design de type « pair-wise » peut être considéré comme un cas particulier du design de type additif, présentant des densités égales pour chaque espèce. Une des difficultés associée à ces différents designs expérimentaux est de distinguer l'effet de la densité totale de chaque espèce de celui relatif à la proportion de chacune sur les interactions (Gibson et al. 1999). Il a ainsi été proposé des designs expérimentaux plus complexes, souvent lourds à mettre en place, correspondant aux « séries additives ». Elles consistent en la mise en place d'associations suivant le design « substitutif » pour différentes proportions de chacune des espèces.

A l'heure actuelle il n'existe pas de réel consensus quant au choix d'un dispositif, chacun présentant des avantages et des limites suivant les questions abordées et les objectifs scientifiques (voir les synthèses de Gibson et al. 1999 ; Connolly et al. 2001). Le choix final dépend des objectifs fixés et des contraintes expérimentales. Dans notre cas, les dispositifs choisis ont été de type substitutif, mais adaptés suivant nos différents sous objectifs.

II.4. Choix du dispositif :

Le dispositif expérimental appliqué dans le cas de notre expérimentation en parcelles au champ correspondait ainsi au type substitutif. L'objectif majeur était d'évaluer le partage des ressources en C, N et P du sol entre les espèces en association en conditions « réelles » au champ. Les densités des cultures monospécifiques correspondaient à celles évaluées comme optimales pour la productivité de chaque espèce. En association la densité de chaque espèce représentait la moitié de celles en culture monospécifique (ratio 50:50 par rapport aux cultures monospécifiques).

III. Protocole expérimental :

III.1. Région et site d'étude :

Cette thèse s'inscrivant dans le cadre du projet Fabatropimed, l'agroécosystème d'étude choisi pour mener à bien les essais sur terrain a été la région sud de France, plus exactement à Montpellier, une région du département de l'Herault, se situant à 10 km de la mer Méditerranée. Cette région est caractérisée par un climat typiquement Méditerranéen.

En outre, l'agroécosystème montpellierain possédant une SAU de 364 hectares de terres agricoles, est dominé par la céréaliculture recouvrant ainsi 41.5 % de la SAU, suivi par la viticulture avec 35.2 % et enfin le reste soit 19.4 % répartis entre maraîchage, jardins et jachère.

L'expérimentation a été menée au sein de la station expérimentale de l'INRA (Institut National de la Recherche Agronomique), situé dans la commune de Mauguio, sud-est de Montpellier (43°37'26.88"N, 3°59'0.34"E). La région est marquée par des précipitations irrégulières, avec une moyenne annuelle de 609 mm pendant la période de 2013 à 2015 (Figure 5). Le mois de juillet est le mois le plus sec (précipitations moyennes d'environ 14 mm), alors que les plus fortes précipitations sont notées en automne (moyenne de 118 mm en septembre), dues principalement aux épisodes cévenols qui caractérisent la région. La température annuelle moyenne est d'environ 15 ° c. Le mois de Juillet se démarque comme étant le mois le plus chaud (moyenne de 25 ° c), tandis que le mois de Février est le plus froid (moyenne de 7 ° c).

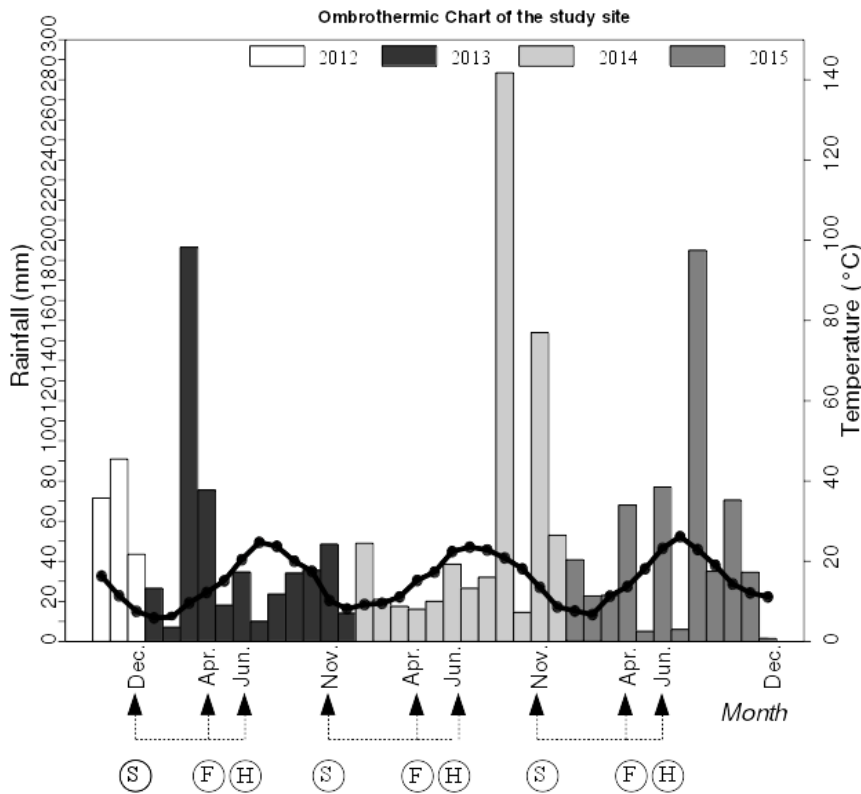


Figure 5 : Diagramme ombrothermique de la région d'étude depuis Octobre 2013 jusqu'à Décembre 2015. Où S = Semi, F = Pleine Floraison et H = Récolte.

III.2. Choix des espèces et cultivars :

L'étude des interactions entre espèces a été réalisée dans le cas de l'association d'une céréale et d'une légumineuse. La céréale retenue, le blé dur (*Triticum durum* L.) a été associée à une légumineuse, la féverole (*Vicia faba* L.). L'expérimentation en parcelle au champ constitue un point majeur de mon projet de recherche : les données présentées dans ce manuscrit sont relatives à des mesures sur la rhizosphère, plante et les émissions de gaz à effet de serre (CO₂), effectuées dans le cadre d'une expérimentation agronomique menée dans la station agronomique INRA Montpellier.

- Choix du cultivar de blé dur :

Faisant suite à des expérimentations en parcelle au champ qui a concerné deux cultivars de blé dur chacun spécifiquement associé à une légumineuse, le pois protéagineux et la féverole. Dans cette expérimentation, un cultivar de blé dur a été choisi sur la base des traits fonctionnels relatifs aux parties aériennes. L'objectif a été d'associer des espèces aux caractéristiques contrastées, dans le but d'optimiser l'acquisition de l'énergie lumineuse (i.e. « complémentarité pour la lumière»). Dans ce contexte, le cultivar LA1823 a ainsi été retenus.

Le cultivar de blé dur LA1823, précédemment utilisé dans le cadre de l'expérimentation en parcelle au champ a été retenu pour son efficacité d'utilisation du N et du P et sa productivité à bas niveau d'intrants. Il est le résultat d'une sélection participative en agriculture biologique, où il est courant de conduire les céréales en l'absence d'intrants fertilisants.

- Choix du cultivar de la féverole :

L'objectif central de mon travail de thèse était d'analyser les interactions pour le N, C et le P dans le cas de l'association d'une céréale à une légumineuse. L'hypothèse principale était que l'introduction d'une légumineuse dans un système de culture, peut jouer un rôle déterminant dans le partage des ressources entre les espèces associées, notamment via des mécanismes de facilitation. La féverole a donc été retenue en raison de sa capacité à prélever une grande partie de son azote de l'air N₂.

Suite à des expérimentations réalisées au préalable dans le cadre du projet Fabatropimed, le cultivar Diva a été sélectionné pour mener à terme nos travaux de recherche, de part sa vitesse de nodulation.

III.3. Dispositif expérimental :

L'expérimentation conduite sur trois saisons culturale entre 2013 et 2015 comprenant un cultivar de blé dur (*Triticum durum*. cv. LA1823) et un cultivar de féverole (*Vicia faba*. cv. Diva) cultivés soit en association soit en monoculture avec rotation entre chaque saison culturale.

Avant le semis, les 20 premiers centimètres de sol ont été labourés mécaniquement à l'aide d'une rotobèche. Un passage avec une herse rotative a été réalisé pour préparer le lit de semis, suivi d'un semis effectué à 4 cm de profondeur à l'aide d'un semoir expérimental. Ensuite, un passage de rouleau lisse a été effectué pour favoriser le contact entre le sol et les semences. De plus, au cours des trois saisons aucun traitement chimique ou d'engrais n'a été appliqué.

Le dispositif expérimental choisi dans notre projet est sous forme de split-plot comprenant quatre répétitions terrains (blocs). Chaque bloc de ce dispositif est fractionné en quatre micro-parcelle et chaque micro-parcelle comprend une modalité de culture à savoir : i) association blé dur-féverole, ii) monoculture blé dur, iii) monoculture féverole, iv) jachère (témoin), à la fin de chaque saison culturale et avant le début de la nouvelle campagne une permutation entre les micro-placette du blé dur et de la féverole est faite afin de suivre l'effet de la rotation en comparaison avec l'association.

La surface totale du dispositif expérimental étant de 2016 m² (longueur = 84 m, largeur = 24 m), répartie sur seize micro-parcelles (quatre blocs, chaque blocs contenant quatre micro-parcelles c'est à dire 4 blocs × 4 micro-placettes = 16), chaque micro-parcelle ayant alors une superficie de 126 m² (longueur = 21 m, largeur = 6 m) (Figure 6). Selon les pratiques courantes des agriculteurs, la

densité de semi était de 350 plants par m² pour le blé dur en monoculture, de 60 plants par m² pour la fève en monoculture et de 175 plants pour le blé dur et de 30 par m² pour la fève en association.

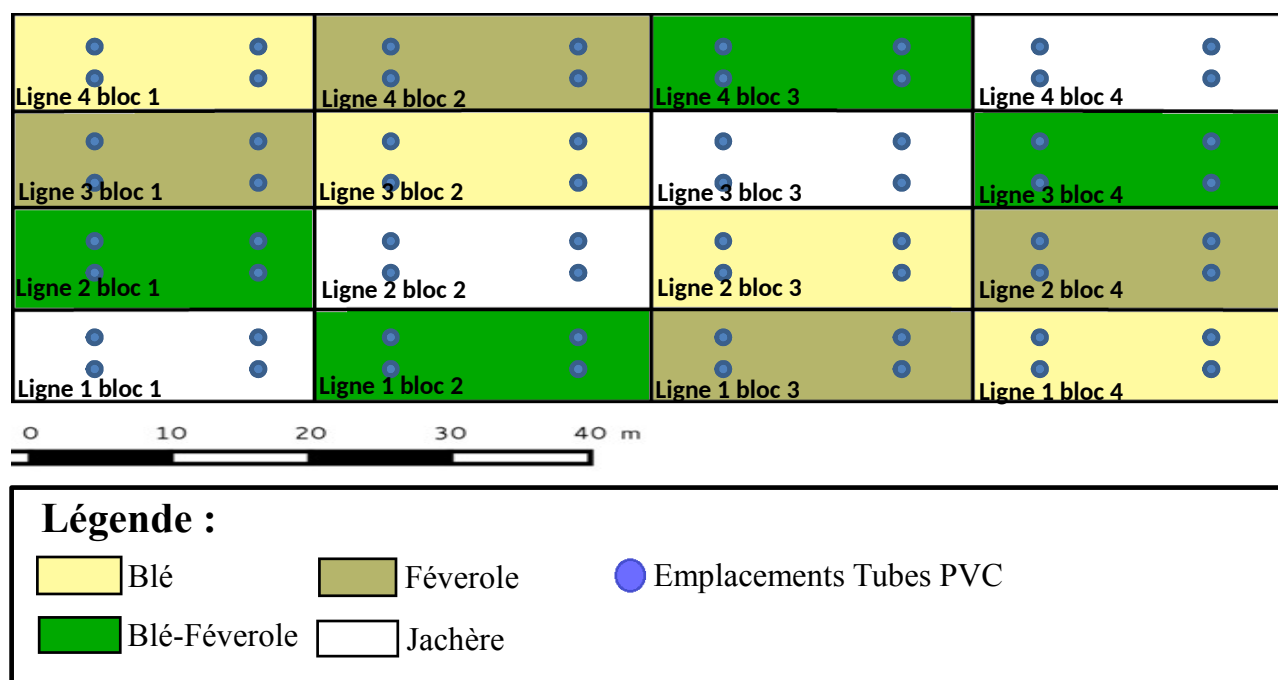


Figure 6 : Dispositif expérimental mis en place depuis 2013 (INRA Mauguio).

La parcelle expérimentale a été utilisée principalement pour la culture de céréales et de légumineuses. Le site est classé en agriculture conventionnelle mais aucune entrée chimique des engrais ou des pesticides n'ont été appliquées depuis 2007. Les pratiques agricoles sont semblables à celle de l'agriculture biologique.

Les sols sont généralement facilement érodables et ont une faible teneur en matière organique. Deux zones principales peuvent être distinguées sur le site, une zone en aval, proche du cours d'eau, où se situent les parcelles étudiées, où les sols sableux-argileux sont formés des alluvions du Rhône et un autre vers l'amont où des sols brun rougeâtres ont été formés par des apports beaucoup plus anciens et liés aux périodes post glaciaire (Figure 7).

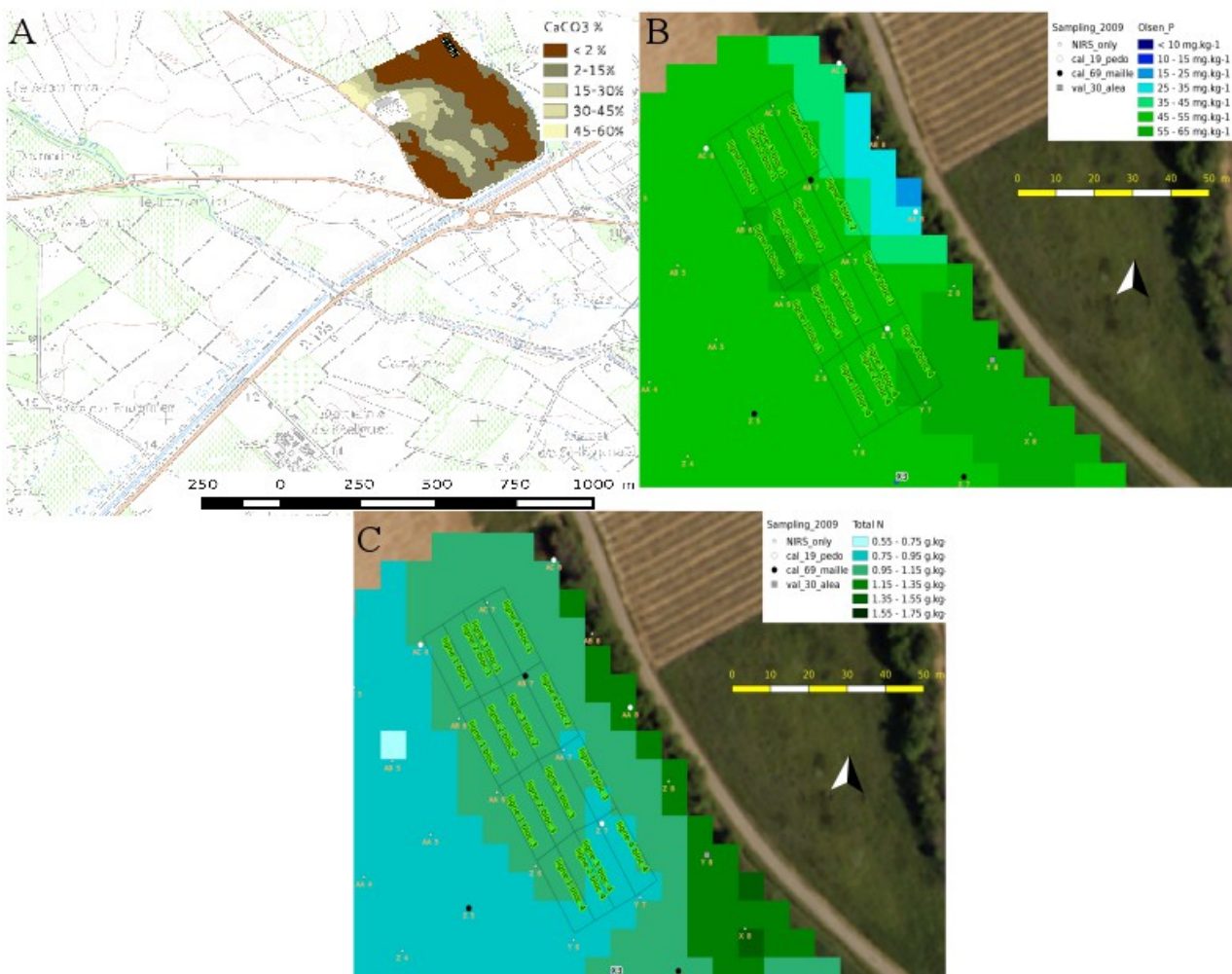


Figure 7 : Cartographie du site expérimental (A) et caractéristiques chimiques (CaCO₃, N et P) effectuées au spectro NIRS(A, B et C).

Tableau 3 : Caractéristique physico-chimique du sol.

Argile (%)	Limon fin (%)	Limon grossier (%)	Sable (%)	pH	CE (mol kg ⁻¹)	CaCO ₃ (g kg ⁻¹)	Corg (mg kg ⁻¹)	N (mg kg ⁻¹)	P (mg kg ⁻¹)
21.9	25.2	21.5	31.4	8.2	21.8	17	10.60	0.90	45.5

Le sol du site expérimental possède une couleur brune-rougeâtre dans la partie supérieure de l'horizon (~ 60 cm d'épaisseur), en partie lexivé de calcium, sur la molasse calcique pliocène, classé comme cambisol chromique.

Le sol est constitué approximativement de 31.4 % Sable, 25.2 % Limon fin, 21.5 Limon grossier et 21.9 % argile, ce qui permet de classer le sol comme étant un sol loam limoneux. De plus, le

tableau 3, montre que le site expérimental est alcalin (pH = 8.2), avec 17 g kg⁻¹ de CaCO₃, et une conductivité électrique de 21.8 mol kg⁻¹.

Les conditions culturale du site expérimental sont déficient en azote total et suffisant en phosphore (inorganic-N (N-NH₄⁺+NO₃⁻) = 0.90 mg N kg⁻¹ , Olsen P = 45.5 mg P kg⁻¹).

III.4. Choix du stade phénologique d'échantillonnage :

Dans l'hypothèse de l'activité microbienne du sol liée à une stimulation des exsudats racinaires de légumineuses comme mécanisme induisant une meilleure nutrition et un meilleur développement des cultures dans les deux système d'association et de rotation céréale-légumineuse nous avons fait le choix de récolter les plantes et le sol au moment où l'activité fixatrice est considérée comme proche du maximum avant de décliner, i.e. à la pleine floraison de la légumineuse (Peña-Cabriales et al. 1993 ; Kyei-Boahen et al. 2002). Ce stade phénologique marque également la fin de la période végétative durant laquelle il est admis que l'essentiel de l'acquisition des nutriments est réalisée.

Cependant, en plus de ce stade phénologique stratégique pour la compréhension des différents mécanismes impliqués dans ces systèmes de culture, s'ajoutent d'autres stades phénologiques d'échantillonnages antérieurs et postérieurs à la pleine floraison de la légumineuse afin de suivre la cinétique d'acquisition des nutriments par les cultures sous les deux systèmes.

En ce qui concerne l'échantillonnage à proprement dit, les prélèvements sont effectués sur quatre à cinq points de façon aléatoire suivant un trait en zigzag. Lors de l'échantillonnage nous veillons à ce que tout le plant soit arraché, de plus, le sol proche racinaire des plants prélevés est soigneusement détaché des racines en veillant à ne pas abîmer ces dernières et regroupé en fonction de la modalité de culture dans un même sac.

Pour la modalité de jachère, seulement quatre à cinq échantillons de sol à une profondeur d'enracinement de 20 à 30 cm sont prélevés de façon aléatoire en suivant la même technique d'échantillonnage que celle utilisée dans les autres modalités.

IV. Mesures sol et plante :

Les informations développées ici représentent uniquement les méthodes et techniques employées hormis les mesures de routine (e.g. mesure de concentration en C, N et P dans les extraits végétaux, sols et biomasse microbienne) ; ces informations sont fournies dans le matériel et méthode des chapitres relatifs.

IV.1. Mesure du C et N :

- Le Dry Combustion Elementary (CHN) :

Cette partie consiste à décrire le fonctionnement générale de l'appareil dénommé **Dry Combustion**

Elementary (NA2000, Fisons Instruments) utilisé dans le but de doser les teneur en C et N des échantillons sols et végétaux. Le recours à l'utilisation de cet appareil découle des différents inconvénients liée aux autres méthodes de dosage de C, car la détermination du carbone organique total (COT) selon la méthode de Dumas nécessite d'une part, le dosage du carbone total (CT) par combustion sèche et d'autre part la détermination du carbone inorganique total (CIT) par calcimétrie. Le carbone organique est alors obtenu par le calcul de la différence entre le carbone total et le carbone minéral ($COT = CT - CIT$). Cependant cette méthode s'adapte mal aux échantillons fortement carbonatés et à faible teneur en matières organiques à cause des incertitudes inhérentes à des valeurs élevées (CT, CIT) qui se cumulent sur des différences faibles (COT).

C'est pourquoi, la détermination directe du carbone organique par la méthode d'oxydation sulfochromique reste envisageable pour les sols fortement carbonatés mais elle pose des problèmes d'hygiène et de sécurité à cause de la manipulation de produits fortement allergisants.

Aussi, le laboratoire d'analyses des sols (LAS-INRA) d'Arras a mis au point une méthode automatisée de décarbonatation des sols carbonatés pour un dosage direct du carbone organique en analyse élémentaire.

La technique du CHN présente l'avantage de doser deux éléments, le carbone et l'azote, lors d'une même analyse. L'analyse avec cet appareil s'effectuant sur de très faibles prises d'essai, entre 10 et 100 mg selon le type d'échantillon, cela implique l'utilisation d'une microbalance et le broyage des sols à moins de 250 μm afin d'éviter les problèmes d'hétérogénéité de l'échantillon (NF ISO 10694).

L'analyse élémentaire par combustion utilise deux tubes installés en série dans une enceinte calorifugée, chaque tube pouvant être chauffé indépendamment. Le premier tube est le siège de la réaction d'oxydation et le deuxième celui de la réaction de réduction.

Pour s'affranchir des problèmes de fractionnement isotopique, il faut que la combustion soit totale. Plusieurs précautions sont donc prises en ce sens. Tout d'abord, un excès d'oxygène est apporté lors de la chute de l'échantillon dans le tube de combustion. L'échantillon est conditionné dans des capsules d'étain qui ont la propriété d'augmenter rapidement la température de 300°C (phénomène de la "combustion flash" où un flash plus clair correspondant à la combustion de l'échantillon et de sa capsule sont visibles). Enfin, le tube est conditionné à l'aide de catalyseurs de la réaction d'oxydation (oxydes de cuivre et de chrome), et de façon à ce que l'échantillon tombe dans la zone la plus chaude du tube.

Les gaz, après réduction à l'aide de paillettes de cuivre réduit, passent par un piège à eau constitué

de perchlorate de magnésium - $\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2$ couramment dénommé "anhydrone". Ils entrent ensuite dans une colonne chromatographique remplie, qui sépare les différents gaz élémentaires avant leur introduction dans le catharomètre (détecteur).

Un catharomètre est un détecteur basé sur la mesure des variations de conductivité thermique d'un flux gazeux. Il possède deux circuits gazeux :

- un circuit de référence où circule le gaz vecteur pur (Hélium).
- un circuit de mesure balayé par un flux gazeux comportant le gaz vecteur (Hélium) ainsi que les gaz dégagés par la combustion de l'échantillon (dioxyde de carbone et azote moléculaire).

Chaque circuit comporte deux résistances (filaments chauffés) et l'ensemble constitue un pont de Wheatstone dont la tension est nulle lorsque de l'hélium pur circule dans chacun des deux circuits.

IV.2. Efficacité d'utilisation de la symbiose rhizobienne (EURS) :

Différentes méthodes sont disponibles afin d'estimer la fixation symbiotique d'azote chez les plantes, et leur usage reste encore débattu (e.g. activité acétylène, mesure isotopique) (Ledgard et Steele 1992 ; Unkovich et al. 2008). Nous avons fait le choix d'estimer l'EURS en suivant le concept élaboré par Drevon et al. (2011). Le principe fondamental de ce concept est que le changement de la biomasse nodulaire corrélé au changement de la biomasse aérienne de la légumineuse peut-être un estimateur de l'efficacité d'utilisation de la symbiose rhizobienne (EURS). De plus, la prise en considération de la biomasse aérienne de la légumineuse dans cette corrélation au détriment de la biomasse totale de la légumineuse afin d'éviter une sous-estimation de la biomasse racinaire lors de l'échantillonnage, car les légumineuses et en particulier la féverole dispose d'un système racinaire pivotant pouvant atteindre des profondeurs dépassant les 70 cm.

Par conséquent, dans notre étude, l'EURS est estimé par la dérivée f' de la fonction de régression linéaire f mettant en corrélation la biomasse aérienne sèche (SDW) et la biomasse nodulaire sèche (NDW). En d'autres termes, si f est la fonction de régression tel que $\text{SDW} = f(\text{NDW})$, alors $\text{EURS} = \text{dérivée de } f = f' = \text{dSDW/dNDW}$.

En appliquant ce concept sur les deux systèmes de cultures mis en place dans notre expérimentation et sur les trois années d'essai, nous avons obtenu des fonctions de régressions linéaire pour la féverole en association et en monoculture, la dérivée de ces régressions donne une constante qui correspond à l'EURS.

IV.3. Mesure du P disponible dans le sol :

La disponibilité du P dans un sol correspond à la quantité de P potentiellement accessible à la plante qui représente une petite fraction du P total du sol (Lanno et al. 2004 ; Harmsen et al. 2007). La

stratégie usuelle de détermination de la disponibilité en P correspond à l'extraction chimique des formes de P dans le sol. De nombreuses méthodes ont été développées afin d'évaluer cette fraction de P potentiellement accessible aux plantes et d'utiliser cet indicateur en agronomie pour gérer les apports de fertilisant. Ces extractions chimiques modifient toutefois les propriétés chimiques du sol et influencent toutefois les processus biogéochimiques déterminant la disponibilité en P. Leur effet est ainsi influencé par les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol. La pertinence des différentes extractions chimiques est évaluée en mettant en relation la concentration en P mesurée dans les extraits au contenu en P des plantes ou à la production de biomasse (i.e. rendement). Certaines extractions chimiques sont ainsi adaptées à des gammes de sol plus ou moins larges (Delgado et Torrent 1997 ; Tang et al. 2009 ; Delgado et al. 2010). Parmi les différentes méthodes, le choix d'extractions selon la méthode Olsen a été retenu (Olsen et al. 1954).

La méthode d'extraction Olsen est largement utilisée pour des sols non acides (Olsen et al. 1954 ; Sims et al. 2000) et s'est avérée adaptée à certains sols acides (Fixen et Grove 1990).

IV.4. Dosage du P végétale :

Afin de doser la teneur en P dans le végétale, la méthode dénommée « **Minéralisation de matériel végétal par micro-ondes avec mini-inserts** » mise au point par J.M Souquet (ingénieur à l'UMR Eco&Sols) a été utilisée. Elle consiste à faire passer dans un four micro-onde le végétale mis en contact avec une solution d'acide nitrique 65 % et introduit dans des réacteurs de 100 ml contenant chacun trois mini réacteurs fermés de 10 ml. L'attaque se réalise dans les mini réacteurs fermés pouvant supporter des pressions de l'ordre de 110 bars. Après une montée en température à 200°C en 15 minutes, cette dernière est maintenue durant 10 minutes. La minéralisation terminée, un délais d'attente minimal de 10 minute doit être observé afin de refroidir les réacteur, Le dosage se fait par colorimétrie à 450 nm après avoir ajouté à l'échantillon un réactif vanadomolybdique entraînant la formation d'un complexe chromophore jaune.

IV.5. Mesure des teneurs en C et en N de la biomasse microbienne du sol :

La biomasse microbienne est la fraction labile et active de la matière organique du sol. Puisqu'elle régule la transformation et le stockage des éléments nutritifs nécessaire à la croissance des plantes (Horwath et Paul 1994). Le renouvellement de la matière organique dans le sol est soit d'une manière continue pour les sols forestiers (chute des feuilles), soit d'une manière discontinue qui dépend de l'homme pour les sols arables (fumier, résidus de récolte, incorporation de paille).

La mesure des teneurs en C et en N de la biomasse microbienne se fait par la méthode « fumigation-Extraction » mise au point par Vance et al. (2003).

Pour déterminer la teneur soit en C soit en N de la biomasse microbienne, un échantillon est fractionné en deux parties, la première sera destinée à la fumigation par exposition au chloroforme (CH_3Cl) dans un dessiccateur pendant 24 h à l'obscurité et à une température de 25°C (Brookes et al. 1985), puis extraite par une solution de K_2SO_4 à 0.5 N. La deuxième partie de l'échantillon n'est pas exposée au chloroforme mais directement extraite par la solution de K_2SO_4 à 0.5 N. La différence entre la teneur en C et en N de l'échantillon fumigé et non fumigé donne la teneur en C et en N de la biomasse microbienne.

V. Analyses et traitements statistique :

Les traitements statistiques ont été réalisés à l'aide du logiciel R (R Core team 2016). L'analyse de la variance à un et deux facteurs (One and Two way Anova) a été appliquée sur la série de données collectées entre 2013 et 2015. Les facteurs impliqués dans cette analyse sont d'une part l'effet séparé de l'année culturale ainsi que l'effet traitement à savoir l'association ou bien la rotation biennale blé-féverole (One way Anova), d'autre part l'effet combiné de ces deux facteurs (Two way Anova) sur les différentes mesures effectuées. Les moyennes sont ensuite classées et regroupées en appliquant le test de comparaison multiple de Tukey's ($p = 0,05$).

De plus, les pentes de régression linéaire obtenues pour l'EURS sont comparées en utilisant le même logiciel R mais en appliquant une analyse de covariance (Ancova), afin de déterminer si les pentes sont significativement différentes entre l'EURS de la féverole mise en association avec le blé et celle en rotation biennale.

Références bibliographiques :

- Bargaz A., Isaac, M.E., Jensen E.S., Carlsson G. 2015. Intercropping of faba bean with wheat under low water availability promotes faba bean nodulation and root growth in deeper soil layers. *Procedia Environ Sci.* 29:111-112.
- Bedoussac L., Journet E. P., Hauggaard-Nielsen H., Naudin C., Corre-Hellou G., Jensen E.S., Prieur L., Justes E. 2015. Ecological principles underlying the increase of productivity achieved by cereal-grain legume intercrops in organic farming. A review. *Agron Sustain Dev.* 35:911-935.
- Betencourt, E., Duputel, M., Colomb, B., Desclaux, D., Hinsinger, P., 2012. Intercropping promotes the ability of durum wheat and chickpea to increase rhizosphere phosphorus availability in low P soil. *Soil Biol Biochem.* 46, 21–33.
- Brookes P. C., Landman A., Pruden G., Jenkinson D.S. 1985. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: a rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil. *Soil biol biochem.* 17:837-842.
- Clergue B., Amiaud B., Pervanchon F., Lasserre-Joulin F., Plantureux S. 2005. Biodiversity: function and assessment in agricultural areas. A review. *Agron Sustain Dev.* 25:1–15.
- Connolly J., Goma H.C., Rahim K. 2001. The information content of indicators in intercropping research. *Agric Ecosys Env.* 87: 191-207.
- Delgado A., Torrent J. 1997. Phosphate-rich soils in the European Union: estimating total plant available phosphorus. *Eur J Agron.* 6: 205-214.
- Delgado A, Campillo C., Torrent J. 2010. Limitations of the Olsen method to assess plant-available phosphorus in reclaimed marsh soils. *Soil Use Manage.* 26:133-140.
- Drevon JJ., Alkama N., Araujo A., Beebe S., Blair M.W., Hamza H., Jaillard B., Lopez A., Martinez-Romero E., Rodino P., et al. 2011. Nodular diagnosis for ecological engineering of the symbiotic nitrogen fixation with legumes. *Procedia Environ Sci.* 9:40–46.
- Duchene O., Vian J.F., Celette F. 2017. Intercropping with legume for agro-ecological cropping systems: Complementarity and facilitation processes and the importance of soil microorganisms. A review. *Agr Ecosyst Environ.* 240:148-161.
- Fixen P.E, Grove J.H. 1990. Testing soils for phosphorus. In: Westerman RL (ed) *Soil testing and plant analysis*, 3rd edn, chap 7. Soil Sci Soc Am, Madison:141-180.
- Gibson D.J., Connolly J., Hartnett D.C., Weidenhamer J.D. 1999. Designs for greenhouse studies of interactions between plants. *J Ecol.* 87:1-16.

- Harmsen J. 2007. Measuring bioavailability: from a scientist approach to standard methods. *J Environ Qual.* 36: 1420-1428.
- Hauggaard-Nielsen H., Gooding M., Ambus P., Corre-Hellou G., Crozat Y., Dahlmann C., Dibet A., von Fragstein P., Pristeri A., Monti M., Jensen E.S. 2009. Pea-barley intercropping for efficient symbiotic N₂-fixation, soil N acquisition and use of other nutrients in European organic cropping systems. *Field Crops Res.* 113:64-71.
- Horwath W.R., Paul E.A. 1994. Microbial biomass. In: *Methods of soil analysis. Part 2. Microbiological and biochemical properties*, Weaver R.W. (Ed.). Soil Sci Soc Am. Madison, pp. 753–773.
- Kaci G., Blavet D., Benlahrech S., Kouakoua E., Couderc P., Deleporte P., Desclaux D., Latati M., Pansu M., Drevon J.J., Ounane, S. M. 2018. The effect of intercropping on the efficiency of faba bean–rhizobial symbiosis and durum wheat soil-nitrogen acquisition in a Mediterranean agroecosystem. *Plant Soil Environ.* 64: 138-146.
- Kyei-Boahen S., Slinkard A.E., Walley F.L. 2002. Time course of N₂ fixation and growth of chickpea. *Biol Fert Soils.* 35:441-447.
- Lanno R., Wells J., Conder J., Bradham K., Basta N. 2004. The bioavailability of chemicals in soil for earthworms. *Ecotoxicol Environ Safe.* 57:39-47.
- Latati M., Bargaz A., Belarbi B., Lazali M., Benlahrech S., Tellah S., Kaci G., Drevon J.J., Ounane S.M. 2016a. 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.
- Ledgard S.F., Steele K.W. 1992. Biological nitrogen fixation in mixed legume/grass pastures. *Plant soil.* 141: 137-153.
- Li B, Li YY, Wu HM, Zhang FF, Li CJ, Li XX, Lambers H, Li L. 2016. Root exudates drive interspecific facilitation by enhancing nodulation and N₂ fixation. *P Natl Acad Sci USA.* 113:6496–6501.
- Malézieux E., Crozat Y., Dupraz C., Laurans M., Makowski D., Ozier-Lafontaine H., Rapidel, B., de Tourdonnet S., Valantin-Morison M. 2009. Mixing plant species in cropping systems: concepts, tools and models. A review. *Agron Sustain Dev.* 29:43-62.
- Moonen A.C., Bàrberi P. 2008. Functional biodiversity: an agroecosystem approach. *Agric Ecosyst Environ.* 127:7–21.
- Olsen S.R., Cole C.V., Watanabe W.S., Dean L.A. 1954. Estimation of Available Phosphorus in Soil by Extraction with Sodium Bicarbonate. *USDA Circular 939.* U.S. Government Printing

Office, Washington, DC.

- Peña-Cabriales J.J., Gragedacabrera O.A., Kola V., Hardarson G. 1993. Time course of N₂ fixation in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Plant Soil*. 152:115-121.
- Philippot L., Raaijmakers J. M., Lemanceau P., & Van Der Putten W. H. 2013. Going back to the roots: the microbial ecology of the rhizosphere. *Nature Rev Microbiol*. 11:789.
- R Core Team. 2016. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Sims J.T., Edwards A. C., Schoumans O. F., Simard R.R. 2000. Integrating soil phosphorus testing into environmentally based agricultural management practices. *J Environ Qual*. 29: 60-71.
- Tang X., Bernard L., Brauman A., Daufresne T., Deleporte P., Desclaux D., Souche S., Placella S.A., Hinsinger P. 2014. Increase in microbial biomass and phosphorus availability in the rhizosphere of intercropped cereal and legumes under field conditions. *Soil Biol Biochem*. 75: 86-93.
- Tang X., Ma Y., Hao X., Li X., Li J., Huang S., Yang X. 2009. Determining critical values of soil Olsen-P for maize and winter wheat from long-term experiments in China. *Plant Soil*. 323:143-151.
- Unkovich M., Herridge D.A., Peoples V. I. D., Cadisch M., G., Boddey, B., Giller K., Chalk P. 2008. *Measuring plant-associated nitrogen fixation in agricultural systems*. Aust Centre Inter Agric Res (ACIAR).
- Vance C.P., Uhde-Stone C., Allan D.L. 2003. Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. *New Phytol*. 157:423-447.
- Wezel A., Casagrande M., Celette F., Vian J.F., Ferrer A., Peigné J. 2014. Agroecological practices for sustainable agriculture. A review. *Agron Sustain Dev*. 34:1–20.
- Willey R.W. 1990. Resource use in intercropping systems. *Agric water manage*. 17:215-231.

I. Introduction :

Pendant la « révolution verte » des années 60, la production agricole s'est accompagnée d'une augmentation spectaculaire des rendements en Europe grâce à l'utilisation de cultivars résistants à la verse et répondant mieux à la fertilisation azotée (Matsushima et al. 2010).

Cependant, l'utilisation massive des intrants chimiques a eu pour conséquences une diminution des apports en matière organique dans les champs agricoles qui s'est traduite par une détérioration physique, chimique et biologique des sols, ainsi qu'une pollution des nitrates des eaux souterraines, l'eutrophisation des rivières, des lacs et des océans et la pollution de l'air par les oxydes nitreux tels que le N₂O (Ohyama 2017). Afin d'éviter ces problèmes la valorisation des services agro-écologiques des légumineuses peut constituer une alternative aux pratiques agricoles conventionnelles.

Il est admis que la rotation incluant des légumineuses qui a remplacé la jachère depuis le 18^{ème} siècle en Europe, en particulier dans le bassin méditerranéen (Grigg 1974) s'est avérée bénéfique en maintenant la fertilité des sols car elle fournit de l'azote nécessaire à l'accumulation de la matière organique du sol (Leighty 1938; Liebman and Dyck 1993). D'autre part, l'association des cultures avec deux ou plusieurs espèces cultivées simultanément dans le même champ peut améliorer les rendements ainsi que l'efficacité d'utilisation des ressources du sol par rapport à la monoculture grâce à des mécanismes de complémentarité, de facilitation et de compétition interspécifique entre les légumineuses associées et les céréales (Hauggaard-Nielsen et al. 2001; Corre-Hellou and Crozat 2005; Latati et al. 2014, 2016a).

L'association céréale-légumineuse peut également augmenter le pool d'azote dans le système plante-sol, ainsi que la croissance et le rendement des céréales associées, en améliorant l'efficacité d'utilisation de la symbiose rhizobienne (EURS) tel que rapporté par Betencourt et al. (2012) dans le cas d'associations blé-niébé et par Latati et al. (2016a&b) pour les associations maïs-haricot. En plein champs, Li et al. (2001) ont remarqué une augmentation significative du rendement du blé cultivé en association avec le soja comparé à leurs rendements respectifs en monoculture. Ils ont montré aussi que, dans un sol déficient en P, la compétition interspécifique avec le soja aide à augmenter la disponibilité de P et de N dans la rhizosphère du blé associé, grâce à la fixation symbiotique de N₂. Dans une expérimentation conduite à long terme, Cong et al. (2014) ont montré que l'association et la rotation blé-féverole augmentaient l'absorption de N et le développement racinaire. Ils ont suggéré l'importance de la facilitation interspécifique, grâce aux services agro-écologiques de la féverole mise en association

Considérant l'impact de l'agriculture intensive sur l'environnement et la santé humaine, ainsi que les nombreuses alternatives proposées, telles que l'association de culture légume-céréale, il semble très intéressant de connaître l'impact de cette association sur la nodulation des racines. Dans quelle mesure ce système affecterait-il l'activité de la symbiose rhizobienne ainsi que l'activité microbienne du sol par rapport à une monoculture de légumineuse. Ce chapitre est consacré à comparer l'association et la rotation bisannuelle du blé dur (*Triticum durum* cv. LA1823) et de la féverole (*Vicia faba* cv Diva) dans les conditions méditerranéennes du sud de la France sur une période de trois ans, l'objectif majeur de cette étude entreprise entre 2013 et 2015 était de voir dans quelle mesure cette association pouvait être plus bénéfique que la rotation bisannuelle pour la croissance du blé et quel serait son effet sur la nodulation, l'activité microbienne du sol et l'efficacité de la symbiose rhizobienne (FAS) de la féverole. De plus nous avons testé l'effet de la présence de la féverole en association sur la nutrition azoté du blé .

II. Matériel et Méthodes :

II.1. Site et dispositif expérimental :

Cette partie a été décrite et détaillée dans le chapitre II : Objectifs et stratégie de recherche.

II.2. Échantillonnage des plantes et du sol rhizosphérique :

Cette partie a été décrite et détaillée dans le chapitre II : Objectifs et stratégie de recherche.

II.3. Dosage de l'azote dans le sol et la plante :

Le principe de base de la méthodologie appliquée afin de doser l'azote dans le sol proche racinaire ainsi que dans le végétale a fait l'objet d'une description générale dans le chapitre II.

II.4. Dosage de l'azote microbien :

L'azote provenant de la décomposition des corps microbiens tués par des vapeurs de trichlorométhane (ou chloroforme) est extrait par une solution de K_2SO_4 . La quantité d'azote organique d'origine microbienne extrait (E_N) est obtenue par la soustraction de l'azote organique (N_T) extrait du sol témoin non fumigé (azote essentiellement non microbien, solubilisé par K_2SO_4) à l'azote organique total (N_F) extrait du sol fumigé. La biomasse microbienne est proportionnelle à E_N à un facteur k_{E_N} ; représente la fraction d'azote microbien extractible après fumigation.

L'azote organique extrait ($mg.l^{-1}$) est déterminé grâce à un analyseur SHIMADZU type TOC-V.

- Calcul :

Azote microbien extrait ($mg N kg^{-1}$) = $E_N = N_F^{(1)} - N_T^{(2)} = (mg N l^{-1} \times FN) - (mg N L^{-1} \times F'N')$.

⁽¹⁾ N_F = N organique extrait du sol fumigé.

⁽²⁾ N_T = N organique extrait du sol non fumigé.

$F'N'$ = facteur de correction

Facteur de correction = (volume du K_2SO_4 ajouté (en ml) + volume d'eau d'humectation du sol (en ml) / masse de sol sec (en g).

Biomasse microbienne = En/kEn

Lorsque l'azote extrait est dosé après oxydation à haute température ou oxydation chimique (UV/persulfate), Joergensen (1996) recommande une valeur de kEN égale à 0,54.

II.5. Indice de nutrition azotée (NNI) :

Lemaire et al. (2008) ont défini l'indice de nutrition azotée (NNI) comme un étant indicateur de la nutrition azotée des cultures. Le NNI a été initialement développé pour une graminée fourragère, *Festuca arundinacea*. CV. Ludelle, par Lemaire et Salette (1984). Il est défini comme le rapport entre l'absorption réelle d'N de la culture (N_a) et l'absorption critique d'N (N_c) correspondant à l'absorption minimale de N sans déficience permettant un taux de croissance maximal à tout moment de la croissance des plantes, de ce fait l'équation est $NNI = N_a / N_c$ (Eq.1). Le NNI peut également être déterminé directement à partir de la concentration réelle en N % N_a et de la concentration minimale en N permettant un taux de croissance maximal % N_c , $NNI = \% N_a / \% N_c$ (Ulrich 1952). Le % N_c est déterminé avec une courbe de dilution empirique telle que % $N_c = ac W^{-b}$ (Eq.2), où W est la masse réelle de la culture (en $t \cdot ha^{-1}$), ac est la concentration critique d'N dans la plante pour $1 t W ha^{-1}$, et b est une constante (Lemaire et al., 2008). Plusieurs expérimentations ont été réalisées sur différentes espèces afin de déterminer les valeurs de ac et b (Lemaire et al. 2008). Pour le blé, les valeurs de ac et b sont respectivement de 5,3% et de 0,44 (Lemaire et al. 2008). NNI a récemment été utilisé pour analyser les relations compétitives entre les espèces pour les ressources en N dans les associations céréales-légumineuses (Latati et al. 2016 a, 2016 b).

II.6. Analyse statistique et calculs :

Afin de comparer les effets du système de culture et de l'année sur la nodulation, la teneur en N de la biomasse microbienne, du sol et de la plante, ainsi que le NNI, des analyses de variance à un et deux facteurs (Anova) ont été réalisées à l'aide du logiciel R (R Core team 2016). Les moyennes ont ensuite été hiérarchisées en utilisant les tests de comparaison multiple de Tukey à $p = 0,05$. Pour les systèmes de culture incluant la féverole et pour chaque année, une relation entre le poids sec aérien (SDW) et nodulaire (NDW) a été déterminée par régression linéaire. Les pentes de ces relations linéaires, qui correspondent à l'EURS, ont été comparées par une analyse de covariance (Ancova) en utilisant le logiciel R.

Afin de comparer les stocks de biomasse par unité de surface équivalente (g m^{-2}), pour la féverole, NDW par plant (en g.plant^{-1}) a été converti en stocks comme suit : $\text{NDW stocks} = \text{NDW} \times \text{SDcorr}$ (Eq.3), où SDcorr est la densité de semis (SD) d'une espèce donnée corrigée par la superficie réellement occupée par cette espèce. Ainsi, $\text{SDcorr} = \text{SD}$ pour les cultures pures, et $\text{SD corr} = \text{SD} / 0,5 = \text{SD} \times 2$ en association de culture puisque la superficie a été réduite de moitié en association pour chaque espèce.

III. Résultats:

III.1. Variation de la nodulation sous l'effet de l'association et de la rotation :

Les résultats obtenues après exécution de l'Anova à deux facteurs sont indiqués dans le tableau 1 (Annexes). Ce tableau montre un effet très hautement significatif de l'année de culture (2013, 2014 et 2015) et du système de culture sur la biomasse nodulaire sèche, mais aucun effet de ces deux facteurs n'est constaté sur le nombre de nodules. Il est à noter que lors de la campagne 2013 le comptage nodulaire n'a pas été effectué et n'a été pris en considération qu'à partir de la campagne 2014.

La figure 8A résultant de l'application de l'Anova à un facteur avec hiérarchisation des moyennes par le test de Tukey, montre une diminution significative de la biomasse sèche nodulaire sous association par rapport à la culture pure lors de la campagne de 2013 de l'ordre de 55 %. Cependant, aucune différence statistique n'est notée lors des deux campagnes 2014 et 2015.

Parallèlement, la figure 8 B, ne montre aucun effet significatif du système de culture sur le nombre de nodules lors des deux campagnes 2014 et 2015.

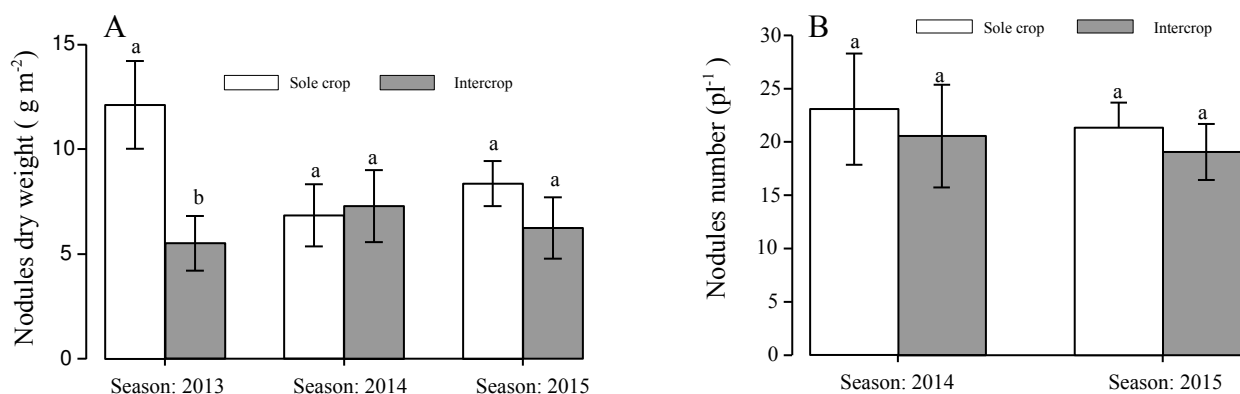


Figure 8 : Variation du poids sec des nodules (A) et du nombre de nodules (B) chez la féverole en culture pure et en association au cours de trois campagnes.

La figure 9 montre la relation entre la biomasse sèche des nodules (NDW) et le nombre de nodules (NN) pour la féverole conduite en culture pure avec rotation bisannuelle et en association. De cette

figure on note des corrélations significatives et positives entre NN et NDW en association et en monoculture dans la rotation bisannuelle. En 2014, la masse nodulaire individuelle est comprise entre 3 et 4 mg quel que soit le système de culture (Fig. 9A). Cependant, il était de 3,8 mg en association contre 5,2 mg en monoculture dans la rotation bisannuelle en 2015 (Fig. 9B).

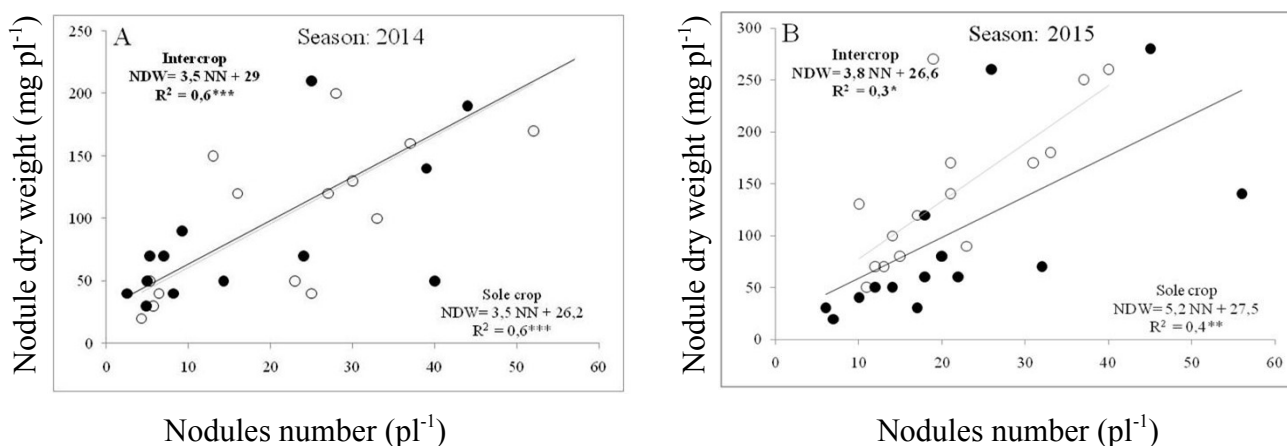


Figure 9 : Poids sec des nodules en fonction du nombre de nodules par plante pour les féveroles en monoculture (points blancs) ou en association (points noirs) pour les années 2014 (A) et 2015 (B). Les équations sur les graphiques sont les régressions pour les cultures pures (texte gris clair) et les cultures en association (texte gris foncé). Toutes les régressions ont été établies à partir de seize répétitions (seize plantes). Les astérisques *, ** et *** indiquent une signification à $p < 0,05$, $p < 0,01$ et $p < 0,001$, respectivement.

III.2. Efficacité d'utilisation de la symbiose rhizobienne (EURS) :

La figure 10 montre des relations significatives entre le poids sec des nodules (NDW) et le poids sec aérien (SDW). L'efficacité d'utilisation des symbiose rhizobienne (EURS) a été estimée par la pente de régression, c'est-à-dire la dérivée de $SDW = f(NDW)$, comme décrit dans le chapitre II. L'analyse de la covariance a montré un effet significatif sur cette pente entre les deux systèmes de culture ($p = 0,0028$ **) et entre les trois années de culture ($p = 0,0011$ **). L'EURS était significativement plus élevé pour la culture en association que pour la monoculture dans la rotation bisannuelle en 2014 (115 vs 49 $gSDW g^{-1}NDW$) et en 2015 (54 vs 12 $gSDW g^{-1}NDW$), mais pas en 2013 (17 vs 11 $gSDW g^{-1}NDW$).

Dans l'ensemble, les modèles de régression linéaire montrent le plus grand taux de fixation symbiotique de l'azote pour la féverole cultivée en association avec le blé lors de la campagne 2014 avec une fixation estimée à 115 $g SDW g^{-1} NDW$. Mais la plus grande différence est notée lors de la campagne 2015 où la féverole conduite en culture pure dans la rotation bisannuelle ne montre pas

de pente de régression significative ($R^2 = 0,02$). Par contre en ten association avec le blé la pente de régression devient hautement significative ($R^2 = 0,43$ **) (Figure 10 C). Ce résultat montre la limite du système de culture en rotation bisannuelle de la féverole en terme de fixation symbiotique de l'azote atmosphérique.

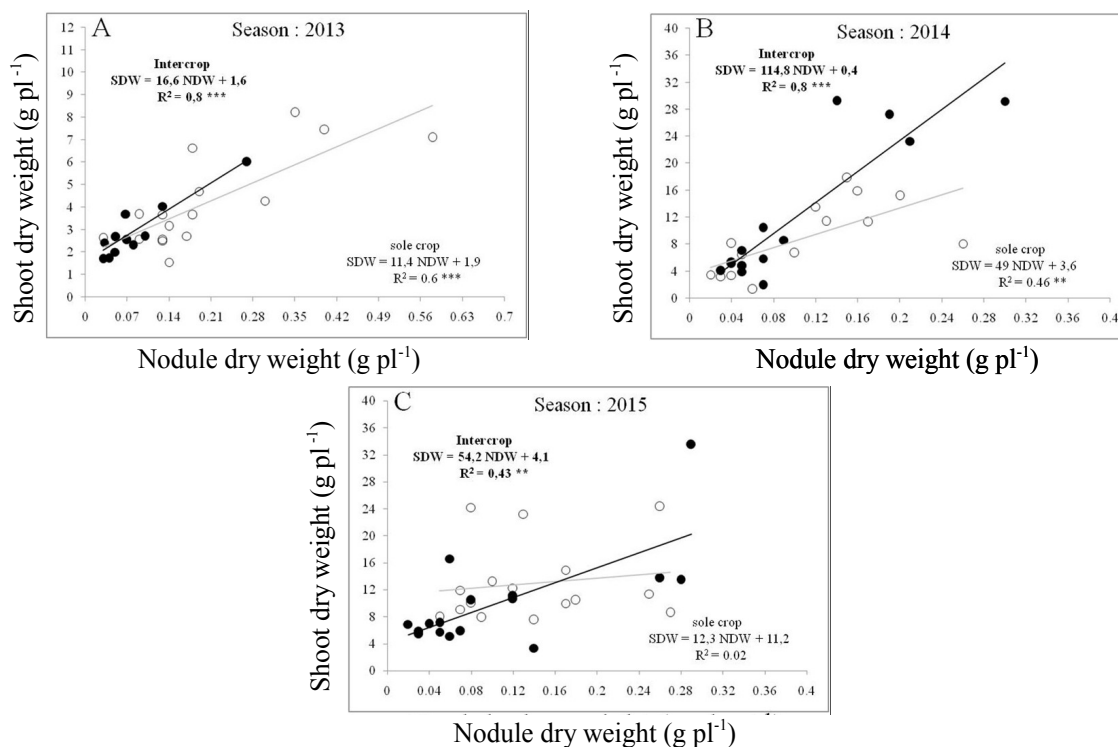


Figure 10 : Efficacité d'utilisation de la symbiose rhizobienne de la féverole sous monoculture avec rotation bisannuelle (points blancs) par rapport à la culture en association (points noirs) pour les années 2013 (A), 2014 (B) et 2015 (C). Les équations sur les graphiques sont les régressions pour les cultures pures (texte gris clair) et les cultures en association (texte gris foncé). Toutes les régressions ont été établies à partir de seize répétitions (seize plantes). Les astérisques *, ** et *** indiquent une signification à $p < 0,05$, $p < 0,01$ et $p < 0,001$, respectivement.

III.3. Teneur en azote dans la plante :

L'anova à deux facteurs montre un effet hautement significatif de l'année de culture ($p = 0,0013$) et de l'interaction année de culture/système de culture ($p = 0,005$), ainsi qu'un effet très hautement significative du système de culture ($p = 6,032.10^{-12}$) sur les teneur en azote de la partie aérienne du blé et de la féverole (Fig.11A et B).

La figure 11A, montre une augmentation significative des teneurs en azote de la partie aérienne du blé en association avec la féverole comparativement au blé dans la rotation bisannuelle ; on note

Chapitre III : Effet de l'association et de la rotation blé/féverole sur le cycle de l'azote

une augmentation de l'ordre de 24 %, 35 % et 24 % respectivement en 2013, 2014 et 2015. Cependant, la figure 11B montre une diminution significative de la teneur en azote de la partie aérienne de la féverole uniquement en 2013 de l'ordre de 32 % entre la féverole pure et la féverole en association, alors qu'aucune différence n'est remarquée lors des années de culture 2014 et 2015. De plus, l'anova à deux facteurs montre un effet très hautement significatif de l'année de culture ($p = 0,0009$) et du système de culture ($p = 1,205.10^{-15}$), ainsi qu'un effet hautement significatif de l'interaction année de culture/système de culture ($p = 0,003$) sur la teneur en azote de la partie racinaire du blé et de la féverole.

La figure 11C, montre une augmentation significative de la teneur en azote de la partie racinaire du blé en association comparativement au blé en rotation bisannuelle ; cette augmentation est de l'ordre de 31 %, 19 % et 13 % respectivement pour 2013, 2014 et 2015. Cependant, la figure 11D et E ne montre aucune différence significative entre la féverole en association et la féverole en rotation bisannuelle en terme de teneur en azote de la partie racinaire et nodulaire.

D'un autre côté, l'analyse de la variance à deux facteurs sur la teneur en azote de la plante entière pour le blé et la féverole a montré un effet très hautement significatif de l'année de culture ($p = 2,07.10^{-6}$) et du système de culture ($p < 2,2.10^{-16}$).

La figure 11F, montre une augmentation significative de la teneur en azote de la plante entière pour le blé en association avec la féverole en comparaison avec le blé en rotation bisannuelle, cette augmentation remarquée est de l'ordre de 23 %, 32 % et 25 % respectivement en 2013, 2014 et 2015. Cependant, aucune différence significative n'est notée en terme de teneur en azote de la plante entière pour la féverole en association et en rotation bisannuelle (Fig.11G).

Chapitre III : Effet de l'association et de la rotation blé/féverole sur le cycle de l'azote

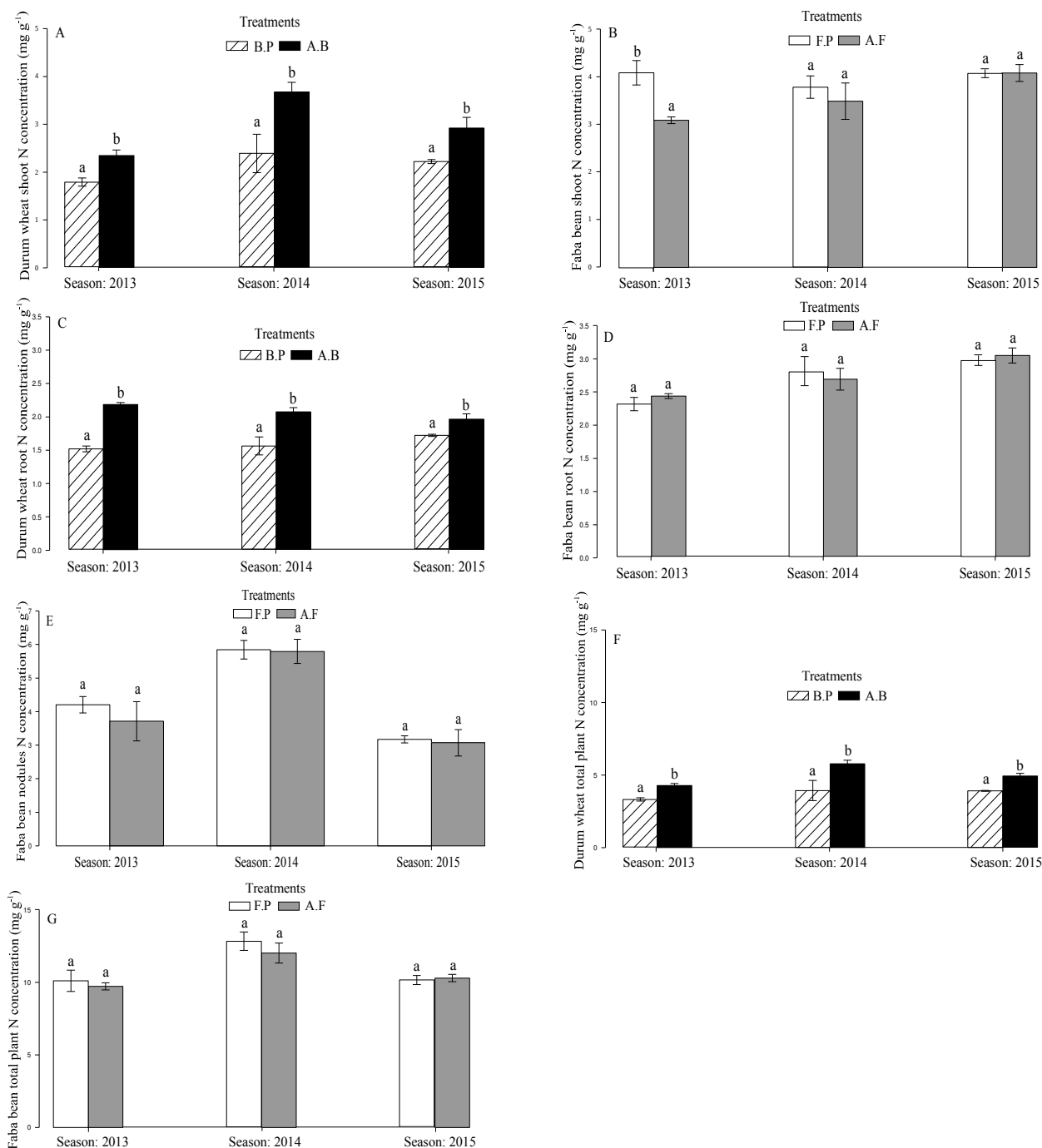


Figure 11 : Teneur en azote, de la partie aérienne du blé (A) et de la féverole (B), de la partie racinaire du blé (C) et de la féverole (D), des nodules (E), ainsi que la teneur en azote totale de la plante pour le blé (F) et pour la féverole (G). Moyennes et SE pour seize répétitions récoltées à 130 jours après le semis. Pour chaque année, les valeurs moyennes étiquetées avec les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes à $p < 0,05$. FP = Féverole pure, AF = Association féverole, BP = Blé pure et AB = Association blé.

III.4. Indice de nutrition azotée (NNI) :

L'analyse de la variance à deux facteurs réalisée sur l'état de la nutrition azotée du blé et de la féverole montre un effet très hautement significatif de l'année de culture ($p = 3,3.10^{-7}$) et du système de culture ($p = 1,6.10^{-9}$), ainsi que de l'interaction année de culture/système de culture ($p = 66.10^{-5}$). Cette interaction n'est pas croisée, mais plutôt dû au fait que le NNI du blé était particulièrement élevé dans le système de culture en association lors de la campagne 2014. De plus, la figure 12A montre que le NNI p du blé dans le système d'association est supérieur à 1 alors qu'il était inférieur ou égale à 1 pour la culture pure dans la rotation bisannuelle. Les taux d'augmentation du NNI du blé en association sont de 56%, 117% et 66% comparé à celui du blé pur en rotation bisannuelle pour les années 2013, 2014 et 2015, respectivement.

De plus, la figure 12B montre un effet significatif du système de culture uniquement lors de l'année culturale 2013 ($p = 6.10^{-4}$) avec une diminution de l'ordre de 31 % du NNI de la féverole en association comparé à la culture pure en rotation bisannuelle, cependant aucun effet du système de culture n'est noté lors des deux années 2014 et 2015.

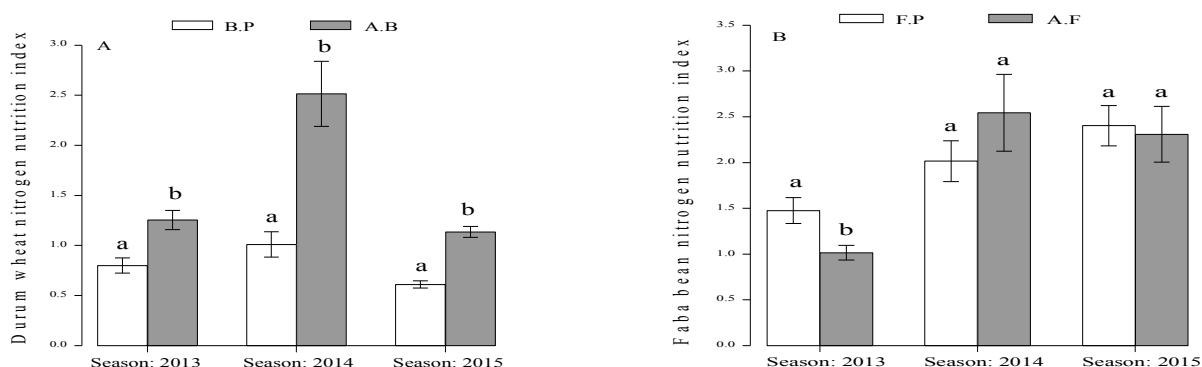


Figure 12 : Indice de nutrition azotée (NNI) du blé dur (A) et de la féverole (B). Moyennes et SE pour seize répétitions récoltées à 130 jours après le semis. Pour chaque année, les valeurs moyennes étiquetées avec les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes à $p < 0,05$. B.P = Blé pur, A.B = Association blé, F.P = Féverole pure et A.F = Association féverole.

III.5. Teneur en azote total du sol :

L'analyse de la variance à deux facteurs sur les teneurs de l'azote total du sol montre un effet très hautement significatif de l'année de culture ($p = 2,64.10^{-5}$), du système de culture ($p = 75.10^{-5}$) et de l'interaction année de culture/système de culture ($p = 4.10^{-5}$).

La figure 13 montre une augmentation significative de la teneur en azote totale du sol uniquement sous l'effet de l'association blé/féverole et de la féverole conduite en culture pure de l'ordre de 8 %

et 14 % respectivement, cependant, aucune augmentation significative n'est notée sous l'effet du système blé conduit en culture pure et de la jachère.

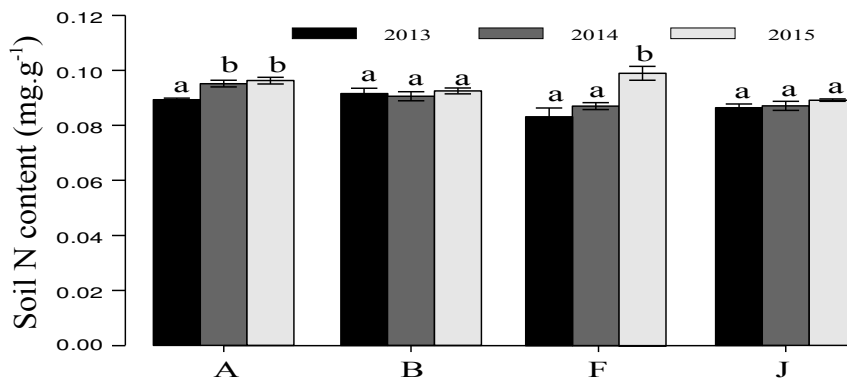


Figure 13 : Teneur en azote total du sol pour l'association blé/féverole (A), blé pure (B), féverole pure (F) et jachère (J) durant les trois années de culture 2013, 2014 et 2015. Moyennes et SE pour douze répétitions récoltées à 130 jours après le semis. Pour chaque année, les valeurs moyennes étiquetées avec les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes à $p < 0,05$.

III.6. Teneur en azote de la fraction microbienne du sol :

L'évaluation de la teneur en azote de la fraction microbienne du sol peut révéler l'état de l'activité microbienne du sol qui s'avère un compartiment très important impliqué dans la dégradation de la matière organique du sol. L'analyse de la variance à deux facteurs a montré un effet très hautement significatif du système de culture ($p < 2,2.10^{-16}$) et de l'interaction année de culture/système de culture ($p = 7,6.10^{-6}$) ainsi qu'un effet hautement significatif de l'année de culture ($p = 13.10^{-4}$).

La figure 14 montre une teneur en N de la fraction microbienne du sol plus élevée en association par rapport au blé et à la féverole en culture pure dans la rotation bisannuel ainsi qu'à la jachère. De même, les teneurs en N de la fraction microbienne obtenues sous l'effet du blé et de la féverole conduite en culture pure dans la rotation bisannuel sont plus élevées en comparaison avec la jachère, durant les trois années de culture.

En 2013 les teneurs en N de la biomasse microbienne étaient plus élevées de 55 %, 48 % 678 % par rapport au blé en culture pure, à la féverole en culture pure et à la jachère, respectivement. De plus, les teneurs obtenues sous les traitements blé et féverole en culture pure sont significativement plus élevées respectivement de 402 % et 424 % par rapport à la jachère.

En 2014 nous notons des teneurs plus élevées sous l'effet de l'association de l'ordre de 25 %, 30 % et 1091 % par rapport au blé en culture pure, à la féverole en culture pure et à la jachère, respectivement. Parallèlement, les teneurs obtenues sous les traitements blé et féverole en culture pure sont significativement plus élevées respectivement de 851 % et 819 % par rapport à la jachère.

Dans le même sens, les résultats obtenus en 2015 sont similaires à ceux obtenus lors des deux années de culture 2013 et 2014, où nous notons une augmentation de l'ordre de 57 %, 67 % et 1430 % sous l'effet de l'association par rapport au blé en culture pure, à la féverole en culture pure et à la jachère, respectivement. De plus, pour les deux systèmes de culture blé pur et féverole pure nous notons des teneurs plus élevées respectivement de 873 % et 813 % par rapport à la jachère.

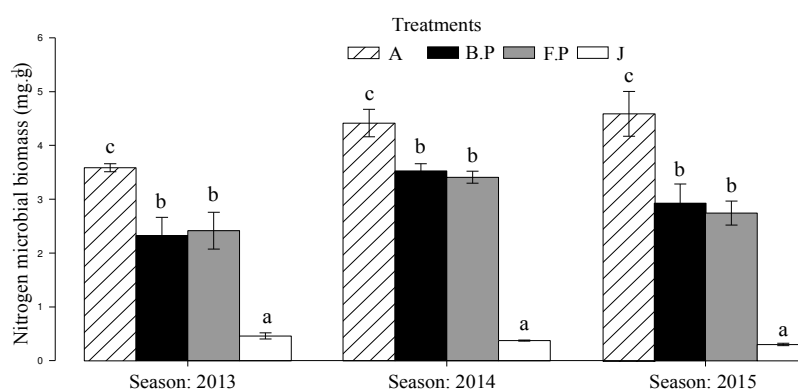


Figure 14 : Teneur en azote de la fraction microbienne pour l'association blé/féverole (A), blé pur (B.P), féverole pure (F.P) et jachère (J) durant les trois années de culture 2013, 2014 et 2015. Moyennes et SE pour douze répétitions récoltées à 130 jours après le semis. Pour chaque année, les valeurs moyennes étiquetées avec les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes à $p < 0,05$.

III.7. Relation entre l'azote nodulaire et l'azote de la fraction microbienne :

La figure 15 montre des relations significatives entre l'azote nodulaire et l'azote de la fraction microbienne du sol. Cette relation a été estimée par la pente de régression, c'est-à-dire la dérivée de $NBM = f(Nn)$, comme décrit dans le chapitre II : Objectifs et stratégie de recherche. L'analyse de la covariance a montré un effet significatif sur cette pente entre les deux systèmes de culture ($p = 0,0018$ **).

De ce fait, la corrélation entre NN et NBM dépend strictement du système de culture, où nous constatons un meilleur coefficient de corrélation sous l'effet de l'association blé/féverole ($R^2 = 0,8^{***}$) en comparaison avec la rotation bisannuel ($R^2 = 0,6^{**}$). La pente de régression linéaire obtenue pour l'association est significativement plus élevée que celle de la rotation bisannuelle (0,5 vs 0,3 mg NBM $mg^{-1}NN$, respectivement).

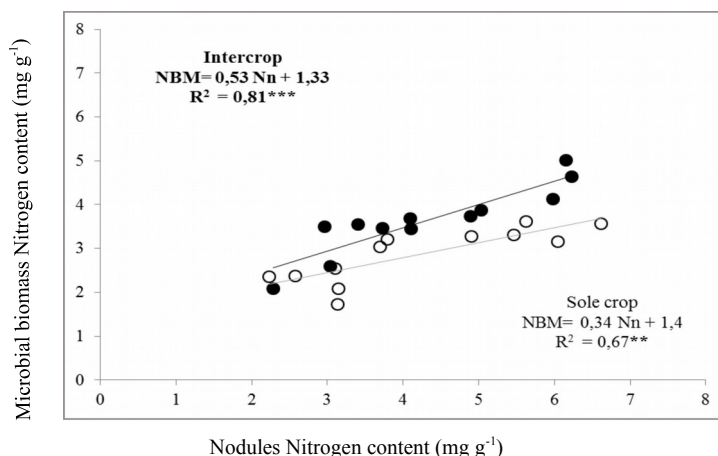


Figure 15 : Azote de la fraction microbienne en fonction de l'azote nodulaire pour les féveroles en monoculture (points blancs) ou en association (points noirs). Les équations sur les graphiques sont les régressions pour les cultures pures (texte gris clair) et les cultures en association (texte gris foncé). Toutes les régressions ont été établies à partir de seize répétitions (seize plantes). Les astérisques *, ** et *** indiquent une signification à $p < 0,05$, $p < 0,01$ et $p < 0,001$, respectivement.

IV. Discussion :

Les principaux résultats de ce travail concernent la nodulation des racines de la féverole ainsi que l'évolution des teneurs en azote de la fraction microbienne du sol. Ils montrent que le système de culture en association affecte significativement l'efficacité de la symbiose rhizobienne (EURS) et la teneur en azote de la biomasse microbienne. Cette augmentation de l'activité microbienne du sol sous le système d'association peut intensifier la nodulation de la féverole et augmenter l'EURS. Des résultats similaires ont déjà été rapportés sur les agroécosystèmes méditerranéens (Latati et al. 2013, 2014, 2016a&b, 2017, Drevon et al. 2011). L'augmentation de l'EURS suggère que l'association de culture augmente l'activité des nodules symbiotiques dans la fixation de l'azote atmosphérique.

De plus, une augmentation de l'azote dans la fraction microbienne du sol est constatée et qui serait due au transfert de l'azote nodulaire vers la biomasse microbienne du sol après la sénescence des nodules tel que rapporté par Latati et al. (2017). La forte corrélation constatée entre NN et NBM sous l'effet de l'association peut aussi expliquer cette augmentation significative de l'azote de la biomasse microbienne du sol comparée à la culture pure dans la rotation bisannuelle. Ces résultats sont en total concordance avec ceux de Tang et al. (2014), qui signalent une augmentation de la biomasse microbienne sous l'effet de l'association blé/pois chiche par rapport à leurs monocultures respectives. Cependant, les faibles teneurs en N de la biomasse microbienne obtenues sous l'effet de la jachère peuvent être expliquées par l'absence d'un travail du sol et d'amendement organique ajouté

afin d'exciter l'activité microbienne du sol. Nos résultats concordent avec d'autres travaux similaires qui signalent une forte corrélation entre NN et NBM sous l'effet de l'association maïs/haricot comparé à la monoculture (Latati et al. 2017).

En 2015, nous avons également remarqué une augmentation de la masse nodulaire individuelle en culture pure dans la rotation bisannuelle comparée à l'association. Plusieurs études de terrain ont abordé l'effet de l'association de cultures dans divers systèmes légumineuses-céréales sur la croissance des nodules dans la région méditerranéenne (Betencourt et al. 2012 ; Latati et al. 2013, 2014, 2016a) et dans des expériences en serre (Li et al. 2016). Cependant, pour les cultures en association de blé et de féverole, nos résultats montrent que NDW par unité de surface équivalente était inférieure pour l'association blé/féverole en 2013 alors qu'en 2014 et 2015, il n'y avait pas de différences significatives dans le nombre de nodules et NDW entre les deux systèmes de culture. Par conséquent, étant donné que la valeur estimative de l'EURS était plus élevée pour les cultures en associations, il semblerait que la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique ne dépend pas uniquement de la biomasse des nodules. Latati et al. (2014) ont également fait état d'un découplage entre l'estimation de l'EURS et la biomasse nodulaire, avec une biomasse de nodules significativement plus faible, mais une estimation plus élevée de l'EURS pour la culture intercalaire. Nos résultats montrent également une augmentation de la teneur en azote dans la partie aérienne, racinaire, ainsi que dans la totalité de la plante pour le blé en association par rapport à la culture pure dans la rotation bisannuelle. Cette augmentation peut être la résultante de l'amélioration de l'EURS tel que rapporté dans la figure 10. Nos résultats sont en concordance avec ceux de Li et al. (2001), qui mentionnent de plus grande teneur en azote pour le blé lorsqu'il est en association avec le soja comparativement à sa monoculture. Szumigalski et Van Acker (2006) constatent des concentrations plus élevées de N dans les cultures de blé et de canola lorsqu'elles étaient cultivées en association avec des pois.

L'indice de nutrition azotée (NNI) indique également que la nutrition azotée était plus élevée pour le blé en association que pour le blé pure dans la rotation bisannuelle. Ceci est similaire aux résultats de Latati et al. (2016a) qui ont trouvé dans un agroécosystème algérien que les NNI du maïs étaient plus élevés en culture intercalaire avec le haricot commun qu'en monoculture. Comme le montrent Lemaire et al. (2008) les valeurs NNI pour le blé en association (valeurs > 1) indiquent un apport suffisant d'azote, tandis que les valeurs NNI en culture pure dans la rotation bisannuelle (valeurs ≤ 1) indiquent une déficience en azote. Cependant, le NNI de la féverole dans cette étude peut ne pas

être précis parce que, selon Lemaire et al. (2008), le coefficient b dans Eq. 2 n'a pas encore été rapporté dans la littérature et le coefficient b obtenu pour les pois a été utilisé ici.

De ce fait, nos résultats pour NNI et concentration en azote de la plante pourraient s'expliquer par la facilitation interspécifique, avec, par exemple, un transfert d'azote de la légumineuse au blé au cours des années (par exsudats racinaires). Les exsudats de blé pourraient également améliorer les taux de fixation de la féverole, tel qu'observé par Li et al. (2016) dans le cas de l'association maïs/fève. Ces résultats peuvent également indiquer que le blé peut dominer la compétition interspécifique avec la féverole pour l'acquisition de l'azote du sol.

D'autre part, nos résultats montrent que les deux systèmes de cultures en association et en rotation bisannuelle semblent avoir séquestré de l'azote dans le sol, tel que montré dans la figure 13, contrairement à la jachère où aucune évolution des teneurs en azote du sol n'est observée. Ces résultats sont en concordance avec ceux de Cong et al. (2014) qui rapportent que dans le cadre d'une expérimentation à long terme, le stockage de l'azote dans le sol était supérieur de $11\% \pm 1\%$ sous l'effet de l'association de la fève avec le maïs et le blé par rapport à leur monoculture respective. Hauggaard-Nielsen et al. (2008) ont signalé que la concentration de N dans le sol était plus élevée dans le cas du pois, de la féverole et du lupin associés à l'orge par rapport à sa monoculture. De même Corre-Hellou et al. (2006) ont montré une concentration plus élevée de N dans le sol sous l'association du pois et de l'orge comparativement à leur monoculture.

Enfin, nos résultats, en accord avec plusieurs études, suggèrent clairement que la compétition du blé pour l'azote du sol augmente l'efficacité d'utilisation de la symbiose rhizobienne de la féverole, et conduit à une augmentation de la biodisponibilité de l'azote pour le blé. Cela dit, il y a encore un besoin de mieux comprendre les conséquences de l'augmentation de la diversité végétale en terme de fonctionnement de l'écosystème, comme l'a souligné il y a plus d'une décennie Loreau (2001). Dans le contexte d'association de cultures, la difficulté majeure est probablement liée au défi de comprendre les changements qui surviennent dans la rhizosphère et d'identifier les mécanismes généraux et les processus clés impliqués dans les interactions plante-microorganismes au-delà de l'influence des conditions du milieu (Duchene et al. 2017). En effet nos résultats montrent clairement une augmentation de l'activité microbienne du sol sous association blé/féverole par rapport aux cultures pures dans la rotation bisannuelle.

V. Conclusion :

Après une expérimentation de trois années sur le terrain, les principaux résultats de cette étude montre que les cultures associées favorisent l'efficacité de la symbiose rhizobienne (EURS) de la féverole, et stimulent l'activité microbienne du sol. De ce fait on observe des teneurs plus élevées en azote de la plante et un indice plus fort de la nutrition azotée chez le blé en association par rapport à la culture pure dans la rotation bisannuelle. Ces résultats peuvent indiquer que le blé associé domine la compétition interspécifique avec la féverole pour l'absorption de l'azote du sol et que la féverole peut utiliser des mécanismes de compensation pour augmenter la fixation symbiotique de l'azote afin de contrer la réduction de l'azote du sol. L'avantage écologique de l'association avec les légumineuses peut avoir un impact significatif sur l'environnement en réduisant les apports d'engrais azotés dans les systèmes de culture intensifs. Nos résultats confirment cet avantage écologique en montrant une augmentation de la teneur en azote organique dans le sol sur les trois saisons de culture.

Cette étude fournit des preuves supplémentaires que l'association céréales-légumineuses est une alternative prometteuse aux systèmes agricoles intensifs sans légumineuses. De plus, les services écologiques fournis par les légumineuses semblent être en mesure de réduire le besoin en intrants d'azote, avec une meilleure productivité des terres et une facilitation de l'acquisition de N du sol.

Références bibliographiques :

- Betencourt, E., Duputel, M., Colomb, B., Desclaux, D., Hinsinger, P., 2012. Intercropping promotes the ability of durum wheat and chickpea to increase rhizosphere phosphorus availability in low P soil. *Soil Biol Biochem.* 46, 21–33.
- Cong W.F., Hoffland E., Li L., Six J., Sun J.H., Bao X.G., Zhang F.S., Van Der Werf W. 2014. Intercropping enhances soil carbon and nitrogen. *Glob Change Biol.* 21:1715–1726.
- Corre-Hellou G., Crozat Y. 2005. Assessment of root system dynamics of species grown in mixtures under field conditions using herbicide injection and ¹⁵N natural abundance methods: a case study with pea, barley and mustard. *Plant Soil.* 276:177–192.
- Corre-Hellou G., Fustec J., Crozat Y. 2006. Interspecific competition for soil N and its interaction with N₂ fixation, leaf expansion and crop growth in pea-Barley intercrops. *Plant Soil.* 282:195–208.
- Drevon J.J., Alkama N., Araujo A., Beebe S., Blair M.W., Hamza H., Jaillard B., Lopez A., Martinez-Romero E., Rodino P., et al. 2011. Nodular diagnosis for ecological engineering of the symbiotic nitrogen fixation with legumes. *Procedia Environ Sci.* 9:40–46.
- Duchene O., Vian J.F., Celette F. 2017. Intercropping with legume for agro-ecological cropping systems: Complementarity and facilitation processes and the importance of soil microorganisms. A review. *Agr Ecosyst Environ.* 240:148-161.
- Hauggaard-Nielsen H., Ambus P., Jensen E.S. 2001. Temporal and spatial distribution of roots and competition for nitrogen in pea-barley intercrops-a field study employing ³²P technique. *Plant Soil.* 236:63–74.
- Hauggaard-Nielsen H., Jørnsgaard B., Kinane J., Jensen E.S. 2008. Grain legume-cereal intercropping: the practical application of diversity, competition and facilitation in arable and organic cropping systems. *Renew Agric Food Syst.* 23:3–12.
- Joergensen R.G. 1996. The fumigation-extraction method to estimate soil microbial biomass: calibration of the kEC value. *Soil Biol Biochem.* 28:25-31.
- Latati M., Blavet D., Alkama N., Laoufi H., Drevon J.J., Gérard F., Pansu M., Ounane S.M. 2014. The intercropping cowpea–maize improves soil phosphorus availability and maize yields in an alkaline soil. *Plant Soil.* 85:181–191.
- Latati M., Bargaz A., Belarbi B., Lazali M., Benlahrech S., Tellah S., Kaci G., Drevon J.J., Ounane S.M. 2016a. 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.

Chapitre III : Effet de l'association et de la rotation blé/féverole sur le cycle de l'azote

- Latati M., Benlahrech S., Lazali M.; Tellah S., Kaci G., Takouachet R., Alkama N., Hamdani F.Z., Hafnaoui E.A., Belarbi B., Ounane G., Ounane S.M. 2016b. Intercropping promotes the ability of legume and cereal to facilitate phosphorus and nitrogen acquisition through root-induced processes, in : Goyal AK, editor, Grain legumes. Rijeka: INTECH Open Access Publisher; p. 127-139.
- Latati M., Aouiche A., Tellah S., Laribi A., Benlahrech S., Kaci G., Ouarem F., Ounane S.M. 2017. Intercropping maize and common bean enhances microbial carbon and nitrogen availability in low phosphorus soil under Mediterranean conditions. *Eur J Soil Biol.*80: 9-18.
- Leighty CE. 1938. Crop rotation, in: *Soils and men: Yearbook of agriculture*. Washington, Leighty CE. (Ed). U.S. Department of Agriculture, Government Printing Office, pp 406-430.
- Lemaire G., Salette J.. 1984. Relation entre dynamique de croissance et dynamique de prélèvement d'azote pour un peuplement de graminées fourragères. *Agronomie*. 1:423-430.
- Lemaire G., Jeuffroy M.H., Gastal F. 2008. Diagnosis tool for plant and crop N status in vegetative stage Theory and practices for crop N management. *Eur J Agron*. 28:614-624.
- Li B., Li Y.Y., Wu H.M., Zhang F.F., Li C.J., Li X.X., Lambers H., Li L. 2016. Root exudates drive interspecific facilitation by enhancing nodulation and N₂ fixation. *Proceed Nat Ac Sci*. 113: 6496–6501.
- Li L., Sun J., Zhang F., Li X., Yang S., Rengel Z. 2001. Wheatmaize or wheatsoybean strip intercropping I. Yield advantage and interspecific interactions on nutrients. *Field Crop Res*. 71:123-137.
- Liebman M., Dyck E. 1993. Crop rotation and intercropping strategies for weed management. *Ecol Appl*. 3:92-122.
- Loreau M. 2001. Microbial diversity, producer-decomposer interactions and ecosystem processes: a theoretical model. *Proc. R. Soc. Lond B Biol Sci*. 268:303–309.
- Matsushima M., Nagano H., Inubushi K. 2010. Grobal nitrogen cycling and its availability from soils. In: *Nitrogen assimilation in plants*, Ohyama T., Sueyoshi K. (eds). Res Signpost, Kerala, pp 19–32.
- Ohyama T. (2017): The role of legume-rhizobium symbiosis in sustainable agriculture. In: Sulieman S., Phan Tran L.S. (eds.): *Legume Nitrogen Fixation in Soils with Low Phosphorus Availability*. Cham, Springer, 1–20.
- R Core Team. 2016. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

Chapitre III : Effet de l'association et de la rotation blé/féverole sur le cycle de l'azote

- Szumigalski A.R., Van Acker R.C. 2006. Nitrogen yield and land use efficiency in annual sole crops and intercrops. *Agron J.* 98:1030-1040.
- Tang X., Bernard L., Brauman A., Daufresne T., Deleporte P., Desclaux D., Souche S., Placella S.A., Hinsinger P. 2014. Increase in microbial biomass and phosphorus availability in the rhizosphere of intercropped cereal and legumes under field conditions. *Soil Biol Biochem.* 75: 86-93.
- Ulrich A. 1952. Physiological Bases for Assessing the Nutritional Requirements of Plants. *Ann Rev Plant Physio.* 3:207-228.

I. Introduction :

Les concentrations atmosphériques en dioxyde de carbone (CO₂), en hémioxyde d'azote (N₂O) et en méthane (CH₄), tous trois gaz à effet de serre, n'ont cessé d'augmenter depuis la révolution industrielle du fait des activités humaines (Moureaux et al. 2008). Le dioxyde de carbone est le gaz qui a l'impact le plus important sur l'effet de serre. Sa concentration atmosphérique ([CO₂]) a augmenté de 280 μmol.mol⁻¹ en 1950 à 379 μmol.mol⁻¹ en 2005 (IPCC 2007). Les mesures effectuées à partir de carottes glacières montrent que cette valeur est supérieure aux concentrations observées durant les 650 000 dernières années, lesquelles auraient oscillé entre 180 et 300 μmol.mol⁻¹. Durant les 10 dernières années, l'augmentation annuelle de CO₂ a été plus importante que l'augmentation moyenne des 45 dernières années, c'est-à-dire la période couverte par des mesures directes de concentration atmosphérique (Moureaux et al. 2008).

En Afrique, par exemple, les chercheurs ont montré que les prévisions d'un impact fortement négatif du changement climatique sur la majorité des cultures se confirme, même si dans certaines zones des effets positifs peuvent apparaître, par exemple en raison d'une pluviométrie plus élevée (Müller et al. 2011 ; Sultan et Gaetani 2016). Des résultats récents montrent que le processus classique de sélection–dissémination–adoption d'une culture comme le maïs est trop long (parfois jusqu'à 30 ans) pour prendre en compte l'impact de l'augmentation de température sur la durée du cycle de la culture en conditions réelles (Challinor et al. 2016). Les observations en Afrique de l'Ouest indiquent que ce changement est déjà en cours, caractérisé par un réchauffement généralisé, un changement dans le régime de la mousson et une augmentation des extrêmes climatiques (Sultan et Gaetani 2016).

Selon Smith et al. (2014), le secteur agricole est aussi responsable d'environ 24 % des émissions de gaz à effet de serre.. Environ la moitié de ces émissions est directement issue d'activités agricoles, comme les émissions liées à la fertilisation minérale des sols et à la fabrication des engrais, la fermentation entérique des ruminants, la décomposition anaérobique de la matière organique des cultures inondées ou la mécanisation agricole.

Cette responsabilité non négligeable dans les émissions globales de gaz à effet de serre impose aux agriculteurs et forestiers de changer leurs pratiques, afin de contribuer à atténuer le changement climatique. Des pratiques agroécologiques et économes en intrants artificiels peuvent contribuer à cette diminution, par exemple l'utilisation de mulch (paillage), les cultures intermédiaires et intercalaires, les bandes enherbées, l'agroforesterie, le biochar, l'agriculture de conservation (ou le

Chapitre IV : Effet de l'association et de la rotation blé/fève sur le cycle du carbone

travail réduit du sol), la couverture permanente du sol, les cultures associées ou en relais, l'amélioration des rations animales et des pratiques de mise au pâturage (Smith et al. 2014).

Les cultures des légumineuses dans les systèmes arables ou les pâturages ont été identifiées en France comme deux des dix mesures les plus significatives pour réduire les gaz à effet de serre en agriculture (Pellerin et al. 2013). En plus de ce rôle les légumineuses (protéagineux, soja, légumes secs, luzerne, trèfles ou vesces en couvert ou en pâturage) apportent aussi des co-bénéfices via une palette de services écosystémiques rendus aux systèmes de culture, (Schneider et Huyghe 2015).

A cet égard, les pratiques agricoles telles que la culture en association de céréales et de légumineuses dans les agroécosystèmes peut améliorer la séquestration de carbone (Scott et al. 2012 ; Cong et al. 2014). Des études récentes ont indiqué que le carbone organique du sol et le carbone de la biomasse microbienne étaient plus élevés dans les systèmes de cultures en association que dans les systèmes de monoculture (Verma et al. 2014). Tang et al. (2014) ont signalé une augmentation significative des stocks de carbone dans la rhizosphère de légumineuses associées avec de faibles apports de matière organique dans le sol. Chapagain et Riseman (2014) ont montré aussi que, comparativement à la monoculture, l'association orge/pois améliore la productivité des terres et le stockage du carbone dans le sol.

D'après une étude de Balesdent et Arrouays (1999) une augmentation de 4 ‰ par an du stock de carbone dans les 40 premiers centimètres de tous les sols de la planète permettrait de compenser l'ensemble des émissions anthropiques de gaz à effet de serre, à condition que l'on arrête également la déforestation tropicale. En effet, grâce aux plantes et autres organismes vivants, les sols de la planète contiennent 1 500 Gt (milliards de tonnes) de carbone (2 à 3 fois plus que l'atmosphère ; 860 Gt dans les 40 premiers centimètres de sol) alors que les émissions anthropiques annuelles de carbone sont de 4,3 Gt. Ce défi 4 ‰ est ambitieux mais réalisable s'il associe le développement économique et la réduction des gaz à effet de serre (Lal 2016).

Une augmentation de 4 ‰ par an est réaliste et peut être obtenue par des pratiques agroécologiques, telles que la couverture permanente du sol par des plantes annuelles (agriculture de conservation) ou des arbres (agroforesterie), la restauration des sols dégradés, l'utilisation de légumineuses fixatrices d'azote en association avec d'autres cultures, l'emploi du fumier ou du compost ou encore les pratiques de collecte de l'eau de pluie ou de ruissellement (Lal 2016).

Dans ce contexte général de séquestration de carbone et réduction de gaz à effet de serre, notre travail dans ce chapitre est axé sur la comparaison de l'association et de la rotation bisannuelle du blé (*Triticum durum* cv. LA1823) et de la fève (*Vicia faba* cv Diva) dans les conditions

méditerranéennes du sud de la France sur une période de trois ans. L'objectif majeur de cette étude entreprise entre 2013 et 2015 était de vérifier si cette association pouvait être plus bénéfique que la rotation bisannuelle pour la croissance du blé et quel serait son effet sur les teneurs du carbone organique du sol ainsi que sur l'activité microbienne du sol.

II. Matériel et Méthodes :

II.1. Site et dispositif expérimental :

Cette partie a été décrite et détaillée dans le chapitre II : Objectifs et stratégie de recherche.

II.2. Échantillonnage des plantes et du sol rhizosphérique :

Cette partie a été décrite et détaillée dans le chapitre II : Objectifs et stratégie de recherche.

II.3. Dosage du carbone dans le sol et la plante :

Le principe de base de la méthodologie appliquée afin de doser le carbone dans le sol proche racinaire ainsi que dans la partie végétale a fait l'objet d'une description générale dans le chapitre II : Objectifs et stratégie de recherche.

II.4. Dosage du carbone microbien :

Le carbone provenant de la décomposition des corps microbiens tués par des vapeurs de trichlorométhane (ou chloroforme) est extrait par une solution de K_2SO_4 . La quantité de carbone organique d'origine microbienne extraite (E_C) est obtenue par la soustraction du carbone organique (C_T) extrait du sol témoin non fumigé (carbone essentiellement non microbien, solubilisé par K_2SO_4) au carbone organique total (C_F) extrait du sol fumigé. La biomasse microbienne est proportionnelle à E_C à un facteur kE_C ; kE_C représente la fraction de carbone microbien extractible après fumigation.

Le carbone organique extrait ($mg.L^{-1}$) est déterminé grâce à un analyseur SHIMADZU type TOC-V.

- Calcul :

Carbone microbien extrait ($mg C kg^{-1}$) = $E_n = C_F^{(1)} - C_T^{(2)} = (mg C L^{-1} \times FC) - (mg C L^{-1} \times F'C')$.

⁽¹⁾ C_F = C organique extrait du sol fumigé.

⁽²⁾ C_T = C organique extrait du sol non fumigé.

$F'C'$ = facteur de correction

Facteur de correction = (volume du K_2SO_4 ajouté (en ml) + volume d'eau d'humectation du sol (en ml) / masse de sol sec (en g).

Biomasse microbienne = E_c/kE_c

Lorsque le carbone extrait est dosé après oxydation à haute température ou oxydation chimique (UV/persulfate), Joergensen (1996) recommande une valeur de kEC égale à 0,45.

II.5. Quantification des émissions de CO₂ du sol dans les différents systèmes de culture :

Les mesures des émissions de CO₂ du sol ont été réalisées sur terrain à l'aide d'un appareil automatisé Li-core (LI-8100A). Dans chaque parcelle du dispositif expérimental quatre cylindres en plastique d'un diamètre de 10 cm et une longueur de 9 cm sont installés aux quatre coins de la parcelle afin d'homogénéiser les mesures et obtenir une moyenne représentative des émissions de CO₂ de la parcelle. Les cylindres sont enfoncés dans le sol à 7 cm tel que recommandé dans le manuel d'utilisation du Li-core (LI-8100A).

Un système de flux d'air sous pression/vide est associé à l'appareil afin de dilater et contracter un soufflet pour élever et abaisser la chambre de mesure sur le cylindre inséré dans le sol dans le but de mesurer le flux de CO₂. Cette conception de chambre minimise les perturbations du microclimat à l'intérieur de la chambre pour des mesures précises et reproductibles, et élimine le besoin d'épurateurs chimiques. Le LI-8100A utilise le taux d'augmentation de CO₂ dans la chambre de mesure pour estimer la vitesse à laquelle le CO₂ diffuse dans l'air libre à l'extérieur de la chambre. Pour qu'une telle estimation soit valide, les conditions doivent être similaires à l'intérieur et à l'extérieur de la chambre; ces conditions comprennent les gradients de concentration entraînant la diffusion, la pression barométrique, la température et l'humidité du sol.

Le gradient de CO₂ entre la couche de surface du sol et l'air n'est pas exactement le même à l'intérieur et à l'extérieur de la chambre, car il y a une augmentation de la fraction molaire de CO₂ à l'intérieur de la chambre. Le taux de diffusion est estimé et corrigé en utilisant une technique analytique qui prend en compte les effets de l'augmentation de la concentration en CO₂ de la chambre sur le gradient de diffusion. Cela permet d'estimer le taux initial d'augmentation de CO₂ qui s'est produit immédiatement après la fermeture de la chambre.

La figure 16 montre qu'à pression constante, la vitesse totale à laquelle l'eau s'évapore dans la chambre sfw (mol s⁻¹) est compensée par un faible débit d'air en dehors de la chambre u (mol s⁻¹). La fraction molaire de CO₂ de l'air à l'extérieur de la chambre est « c_a », à l'intérieur de la chambre est « c_c », et dans le sol est « c_s », tout en mol mol⁻¹. La fraction molaire de la vapeur d'eau dans l'air de la chambre est w_c (mol mol⁻¹). La constante de vitesse k (s⁻¹) caractérise les fuites (le cas échéant) dues à la diffusion du CO₂ entre la chambre du sol et l'air extérieur. Le volume de la chambre v comprend le volume de la pompe et la boucle de mesure. De ce fait, le bilan de masse pour le CO₂, la vapeur d'eau et l'air est la différence entre le flux entrant et le flux sortant du sol.

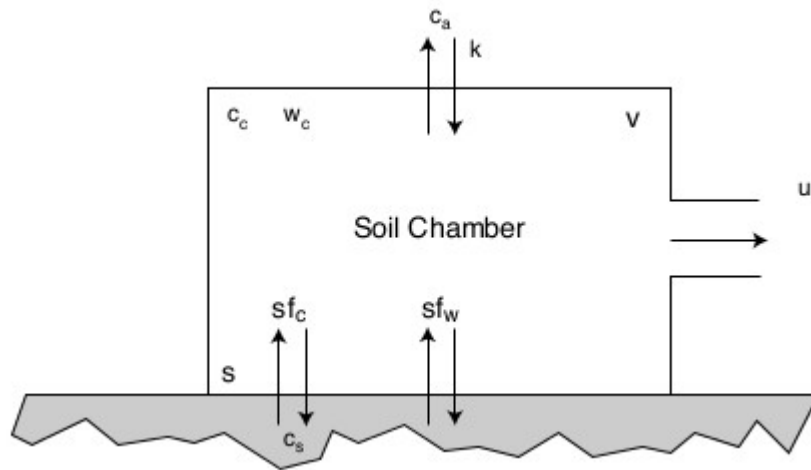


Figure 16 : Diagramme représentant une chambre de volume v (m^3) et de surface S (m^2) reposant sur le sol, avec un taux d'émission de CO_2 f_c ($mol\ m^{-2}\ s^{-1}$) et un taux de flux d'évaporation d'eau f_w ($mol\ m^{-2}\ s^{-1}$) (Source : Manuel d'utilisation Li-core LI-8100A).

II.6. Analyse statistique et calculs :

Afin de comparer les effets du système de culture et de l'année sur la biomasse sèche des plantes, la teneur en carbone de la biomasse microbienne, du sol et de la plante, des analyses de variance à un et deux facteurs (Anova) ont été réalisées à l'aide du logiciel R (R Core team 2016). Les moyennes ont ensuite été hiérarchisées en utilisant les tests de comparaison multiple de Tukey à $p = 0,05$. Pour les systèmes de culture incluant la féverole et pour chaque année, une relation entre la teneur en carbone de la biomasse microbienne (CBM) et la teneur en carbone des nodules (C_n) a été déterminée par régression linéaire. Les pentes de ces relations linéaires ont été comparées par une analyse de covariance (Ancova) en utilisant le logiciel R.

Afin de comparer les stocks de biomasse par unité de surface équivalente ($g\ m^{-2}$) pour les deux cultures, DW par plant (en $g.plant^{-1}$) ont été convertis en stocks comme suit : $DW\ stocks = DW \times SD_{corr}$ (Eq.X), où SD_{corr} est la densité de semis (SD) d'une espèce donnée corrigée par la superficie réellement occupée par cette espèce, et DW (Dry weight) est le poids sec de la partie de la plante. Ainsi, $SD_{corr} = SD$ pour les cultures pures, et $SD\ corr = SD / 0,5 = SD \times 2$ en association de culture puisque la superficie a été réduite de moitié en association pour chaque espèce.

Les flux i $CO_2\ C$ dégagés du sol obtenus sont en $\mu mol\ CO_2\ C\ m^{-2}\ s^{-1}$ et sont convertis en flux journalier d $CO_2\ C$ en $g\ CO_2\ C\ m^{-2}\ day^{-1}$ suivant la formule :

$$d\ CO_2\ C = 1,0368 \times i\ CO_2\ C.$$

III. Résultats :

III.1. Effet des systèmes de culture sur la croissance des plantes :

L'analyse de la variance à deux facteurs montre un effet très hautement significatif du système de culture sur la biomasse sèche aérienne du blé ($p = 12.10^{-5}$); cependant cette même analyse appliquée sur la biomasse sèche aérienne de la féverole ne révèle aucun effet significatif du système de culture ($p = 0,95$) mais plutôt un effet très hautement significatif de la saison de culture ($p = 1,7. 10^{-5}$) (Fig. 17A et B).

La figure 17A montre une augmentation significative de la biomasse sèche aérienne du blé dans le système de culture en association par rapport au blé dans la rotation bisannuelle et ceci au cours des trois saisons de culture. Cette augmentation est de l'ordre de 32 %, 136 % et 52 % lors des saisons de culture 2013, 2014 et 2015 respectivement. Cependant, la figure 17B ne montre aucun effet significatif du système de culture sur la biomasse sèche aérienne mais plutôt une augmentation significative au cours des trois saisons de culture estimée à 228 % et 208 % respectivement pour la féverole en association et en rotation bisannuelle.

D'autre part, l'anova à deux facteurs appliquée sur la biomasse sèche racinaire du blé et de la féverole montre que le système de culture a un effet très hautement significatif sur la biomasse sèche racinaire du blé ($p = 8,1.10^{-15}$); par ailleurs, un effet significatif est signalé sur la biomasse sèche racinaire de la féverole lors des saisons 2014 et 2015 ($p = 8.10^{-3}$ et $p = 0,05$ respectivement). Par ailleurs, il apparaît que la saison de culture et l'interaction saison de culture/système de culture affectent significativement la biomasse sèche racinaire de la féverole ($p = 8,2.10^{-5}$ et $p = 2,9.10^{-3}$ respectivement) mais ces deux derniers facteurs n'ont aucun effet sur la biomasse sèche racinaire du blé ($p = 0,93$ et $p = 0,9$ respectivement).

La figure 17C montre une augmentation significative de la biomasse sèche racinaire du blé en association avec la féverole en comparaison avec le blé en rotation bisannuelle, cette augmentation remarquable est de l'ordre de 488 %, 376 % et 372 % en 2013, 2014 et 2015 respectivement. De plus, la figure 17D montre une augmentation de la biomasse sèche racinaire de la féverole que lors des deux saisons 2014 et 2015 estimée à 66 % et 33 % respectivement. Une augmentation de 50 % et de 98 % de la biomasse racinaire chez la féverole en association et en rotation bisannuelle respectivement, est observée sur les trois années.

Enfin, une analyse de l'effet des deux facteurs (ndlr, systèmes de culture et saisons de culture) sur la biomasse totale du blé et de la féverole a été réalisée. L'analyse de la variance à deux facteurs

Chapitre IV : Effet de l'association et de la rotation blé/féverole sur le cycle du carbone

montre un effet très hautement significatif du système de culture sur la biomasse totale du blé ($p = 5,4.10^{-7}$) mais aucun effet sur la biomasse totale de la féverole ($p = 0,4$). Il apparaît aussi que les trois saisons de culture ont un effet très hautement significatif sur la biomasse totale de la féverole ($p = 4,1.10^{-5}$), mais elles n'ont aucun effet sur la biomasse totale du blé ($p = 0,32$).

La figure 17E montre une augmentation significative de la biomasse totale du blé en association avec la féverole comparativement au blé dans la rotation bisannuelle. Cette augmentation est de l'ordre de 75 %, 119 % et 85 % en 2013, 2014 et 2015 respectivement. D'autre part, la figure 17F ne montre aucune différence entre les systèmes de culture, malgré une augmentation au cours des trois saisons de culture de 172 % et 205 % pour la féverole en association et en rotation bisannuelle respectivement.

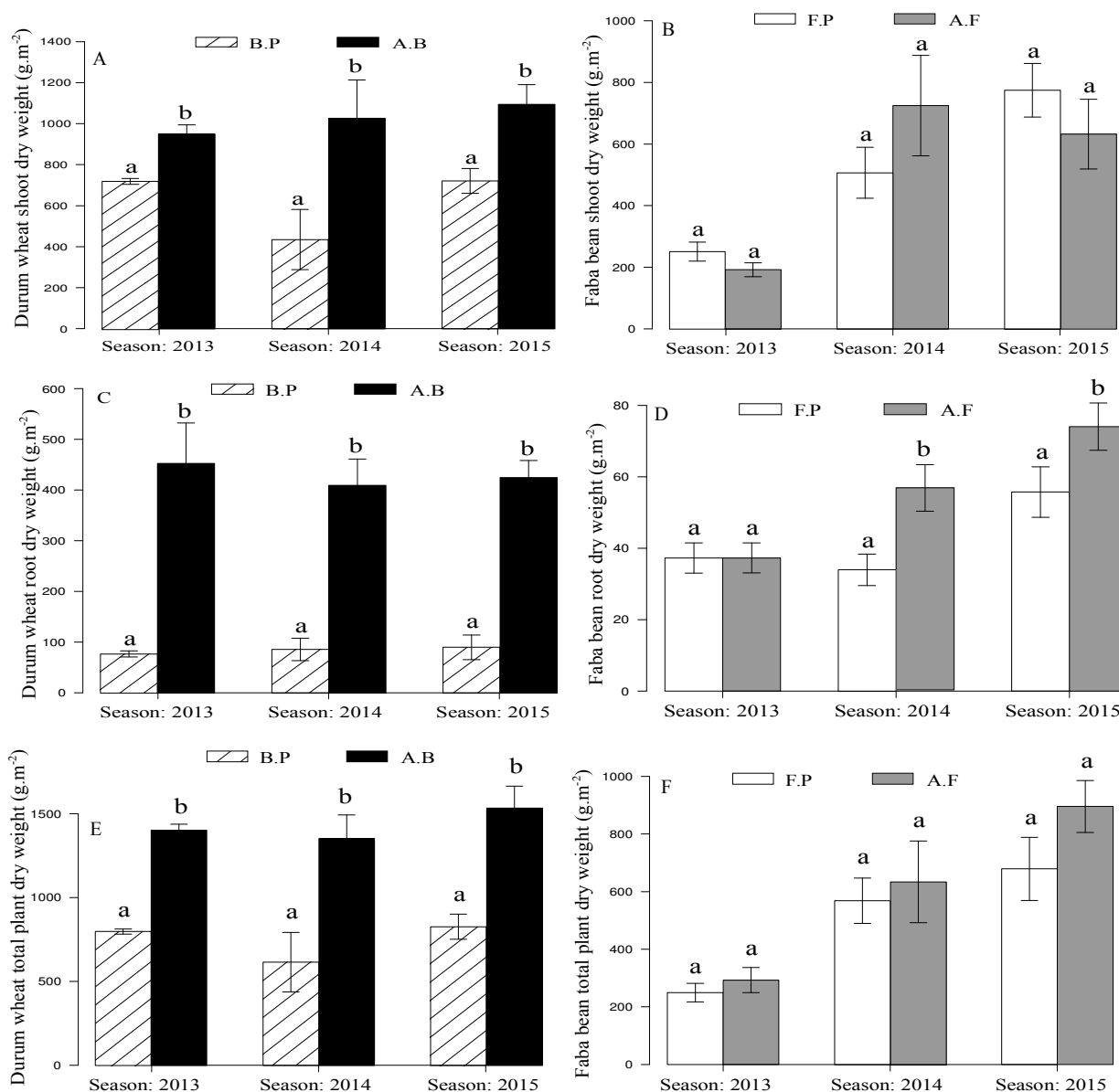


Figure 17 : biomasse sèche aérienne du blé (A) et de la féverole (B), de la partie racinaire du blé (C) et de la féverole (D), ainsi que la biomasse sèche totale de la plante pour le blé (E) et pour la féverole (F). Moyennes et SE pour seize répétitions récoltées à 130 jours après le semis. Pour chaque année, les valeurs moyennes étiquetées avec les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes à $p < 0,05$. FP = Féverole pure, AF = Association féverole, BP = Blé pure et AB = Association blé.

III.2. Effet des systèmes de culture sur le rendement et la qualité du grains :

L'analyse de la variance à deux facteurs montre un effet très hautement significatif du système de culture sur le rendement en grain du blé ($p = 9.10^{-8}$), alors que le rendement en grain de la féverole n'est affecté ni par le système de culture ($p = 0,08$) ni par la saison de culture ($0,07$) (Fig. 18B).

La figure 18A montre, une augmentation significative du rendement en grain du blé en association par rapport au blé en rotation bisannuelle. Cette augmentation est de l'ordre de 45 %, 55 % et 110 % respectivement en 2013, 2014 et 2015.

Par ailleurs, les teneurs en protéines des graines de blé et de féverole sont significativement affectées par le système de culture ($p = 4,7.10^{-14}$ et $p = 5,3.10^{-6}$ respectivement pour le blé et la féverole), de plus les teneurs en protéines du blé sont également affectées significativement par la saison de culture et l'interaction système de culture/saison de culture ($p = 4.10^{-12}$ et $p = 3,5.10^{-6}$ respectivement).

La figure 18C montre une augmentation significative des teneurs en protéines du blé en association par rapport au blé dans la rotation bisannuelle. Cette augmentation est constatée lors des saisons 2013, 2014 et 2015 de l'ordre de 81 %, 49 % et 26 % respectivement. De même la figure 18D montre une augmentation des teneurs en protéines de la graine de féverole de l'ordre de 18 %, 31 % et 26 % respectivement en 2013, 2014 et 2015.

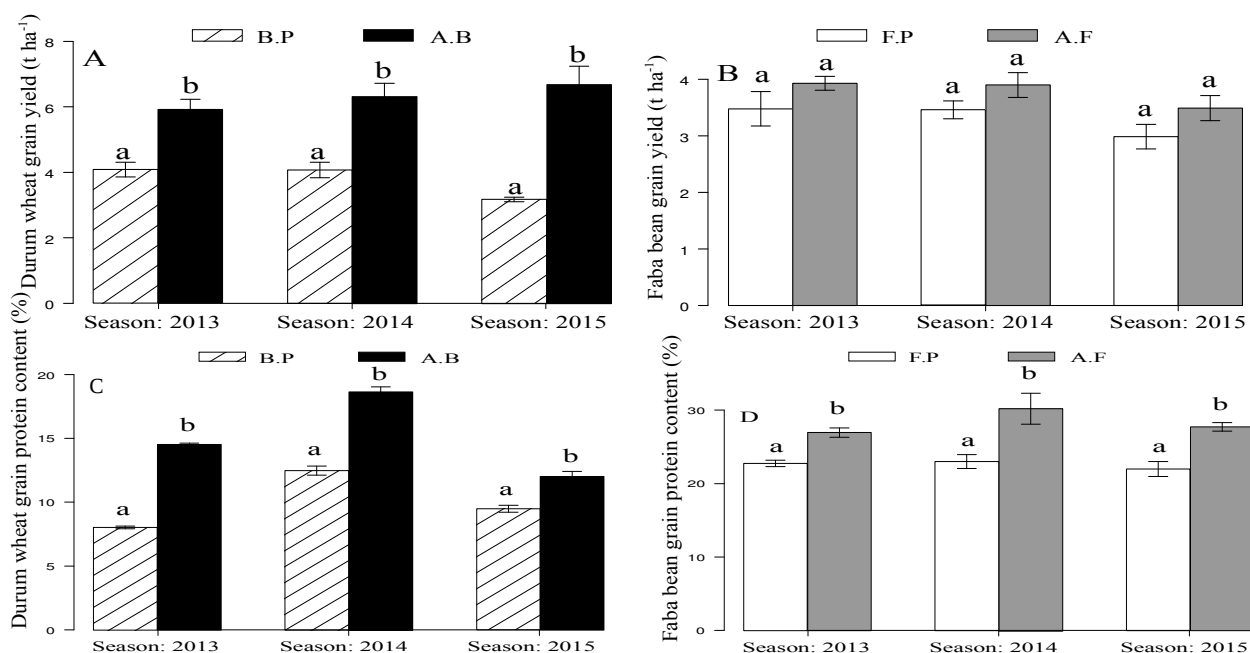


Figure 18 : Rendement en grain du blé (A) et de la féverole (B), teneurs en protéines du blé (C) et de la féverole (D). Moyennes et SE pour seize répétitions récoltées à 130 jours après le semis. Pour chaque année, les valeurs moyennes étiquetées avec les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes à $p < 0,05$. FP = Féverole pure, AF = Association féverole, BP = Blé pure et AB = Association blé.

III.3. Effet des systèmes de culture sur la teneur en carbone de la plante :

Dans le but de comprendre l'effet des deux systèmes de culture sur les teneurs en carbone des plantes (blé et féverole), un dosage du carbone de la partie aérienne, de la partie racinaire, de la plante totale et des nodules a été réalisé. ,

L'analyse de la variance à deux facteurs sur les teneurs en carbone de la partie aérienne révèle que le blé est significativement affecté par le système de culture ($p = 1,7.10^{-8}$) et non par la saison de culture ($p = 0,9$). La même analyse révèle que la teneur en carbone de la partie aérienne de la féverole n'est affectée que par la saison de culture ($p = 3,2.10^{-4}$).

Tel que représenté dans la figure 19A, les teneurs en carbone de la partie aérienne du blé ont augmenté significativement lors des trois saisons de culture 2013, 2014 et 2015 de 8 %, 7 % et 8 % respectivement. De plus, les teneurs en carbone de la partie aérienne de la féverole ont augmenté au cours des trois saisons de culture de façon significative de 2 % et 4 % respectivement pour la féverole en association et en rotation bisannuelle (Fig.19B).

Par ailleurs, l'analyse de l'anova à deux facteurs a montré que les teneurs en carbone de la partie racinaire du blé ont été significativement influencées par le système de culture ($p = 1,1.10^{-7}$) mais aucun effet de la saison de culture n'est signalé ($p = 0,58$). Contrairement au blé, les teneurs en carbone de la partie racinaire de la féverole sont significativement affectées par la saison de culture ($p = 1,6.10^{-6}$) mais cette analyse ne révèle aucun effet du système de culture ($p = 0,6$).

La figure 19C montre une augmentation des teneurs en carbone de la partie racinaire du blé en association par rapport au blé dans la rotation bisannuelle de 8 %, 6,5 % et 7,4 % lors des saisons de culture 2013, 2014 et 2015 respectivement. Contrairement à la figure 19C, la figure 19D ne montre aucune augmentation des teneurs de carbone de la partie racinaire de la féverole entre les deux systèmes de culture, mais plutôt une augmentation au cours des trois saisons de culture de l'ordre de 28 % et 24,5 % respectivement pour la féverole en association et dans la rotation bisannuelle.

En ce qui concerne les teneurs en carbone total des plantes, l'anova à deux facteurs montre que le système de culture a un effet très hautement significatif sur la teneur en carbone total du blé ($p = 2,9.10^{-10}$), cependant il s'avère que la teneur en carbone total de la féverole n'est pas affectée par le système de culture mais uniquement par la saison de culture ($p = 2.10^{-6}$).

La figure 19E montre que les teneurs en carbone total du blé augmentent significativement sous l'effet de l'association par rapport à la rotation bisannuelle, cette augmentation est de l'ordre de 8 %, 7 % et 7,5 % respectivement en 2013, 2014 et 2015. Par contre, la figure 19F ne montre aucune augmentation des teneurs en carbone total de la féverole entre les deux systèmes de culture mais

Chapitre IV : Effet de l'association et de la rotation blé/féverole sur le cycle du carbone

plutôt une augmentation au cours des trois saisons de culture. Cette augmentation entre la saison 2013 et 2015 est estimée à 7,4 % et 8,7 % respectivement pour la féverole en association et dans la rotation bisannuelle.

Enfin, l'analyse de la variance à deux facteurs appliquée aux teneurs en carbone des nodules montre un effet hautement significatif de la saison de culture ($p = 9.10^{-3}$) et de l'interaction système de culture/saison de culture ($p = 4,7.10^{-3}$). Cette forte interaction est essentiellement due au fait que lors des deux saisons de culture 2014 et 2015, les teneurs en carbone des nodules ont été significativement affectées par le système de culture. En effet l'anova à un facteur montre des différences significatives entre les deux systèmes de culture en 2014 et 2015 avec des probabilités de $p = 0,03$ et $p = 0,014$ respectivement.

La figure 19G montre que les teneurs en carbone des nodules augmentent significativement sous l'effet de l'association comparativement à la rotation bisannuelle de 8 % et 5,5 % respectivement en 2014 et 2015.

Chapitre IV : Effet de l'association et de la rotation blé/féverole sur le cycle du carbone

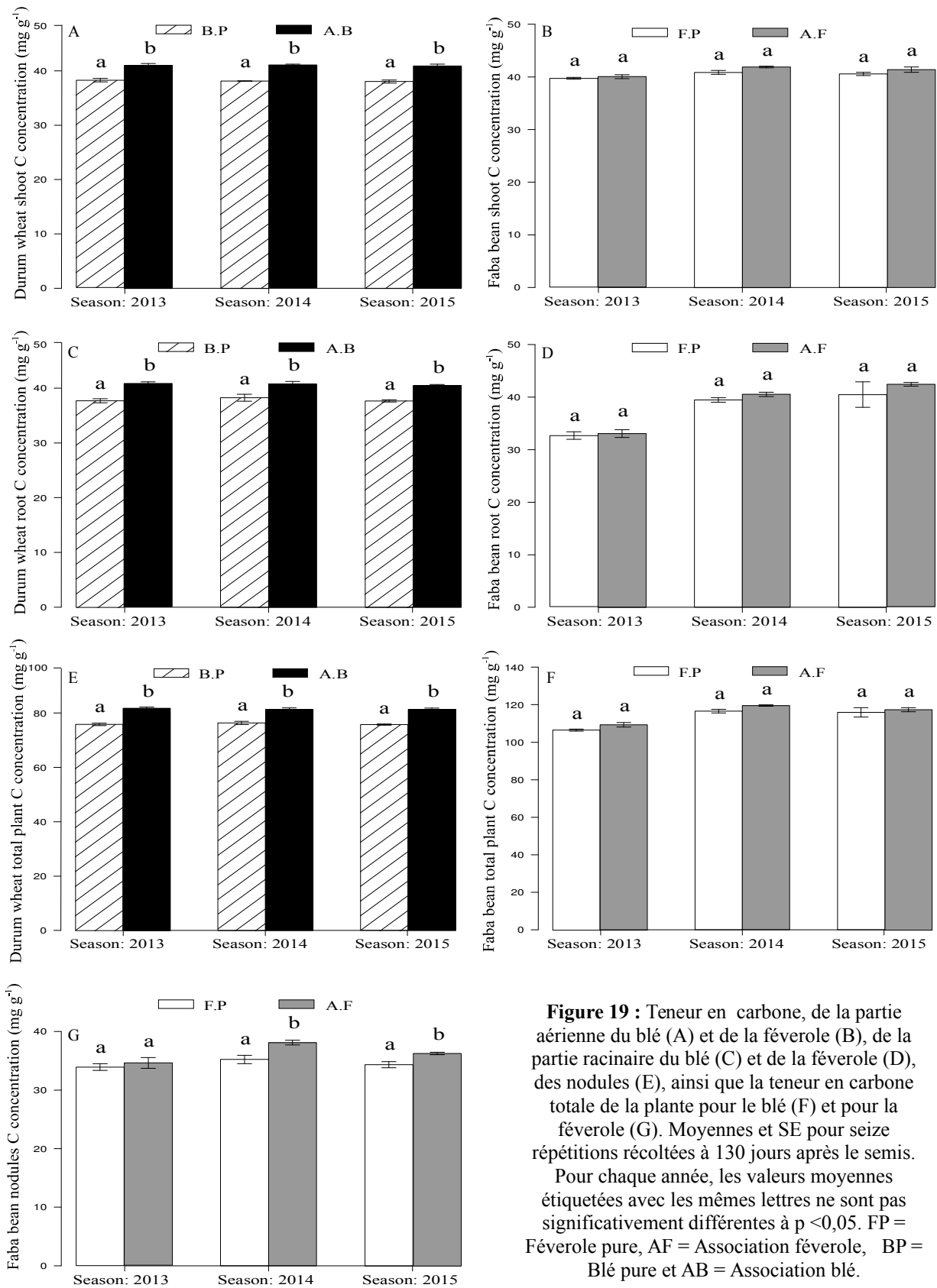


Figure 19 : Teneur en carbone, de la partie aérienne du blé (A) et de la féverole (B), de la partie racinaire du blé (C) et de la féverole (D), des nodules (E), ainsi que la teneur en carbone totale de la plante pour le blé (F) et pour la féverole (G). Moyennes et SE pour seize répétitions récoltées à 130 jours après le semis. Pour chaque année, les valeurs moyennes étiquetées avec les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes à $p < 0,05$. FP = Féverole pure, AF = Association féverole, BP = Blé pure et AB = Association blé.

III.4. Effet du système de culture sur la séquestration de carbone dans le sol :

Dans la perspective d'étudier l'effet des systèmes de culture et de la saison de culture sur la séquestration de carbone dans le sol, une analyse de la variance à deux facteurs a été effectuée sur le jeu de données collectées depuis la saison culturale 2013. Cette analyse démontre que les deux systèmes de culture à savoir l'association et la rotation bisannuelle blé/féverole ont séquestré du carbone au cours des trois saisons de culture comparativement à la jachère ($p = 4,8.10^{-4}$).

La figure 20 révèle une augmentation des teneurs de carbone durant la période 2013 à 2015 de l'ordre de 23 %, 20 % et 22 % respectivement sous l'effet de l'association, du blé et de la féverole dans la rotation bisannuelle. Mais, aucune augmentation de la teneur en carbone du sol n'est constatée au cours des trois saisons de culture dans la jachère.

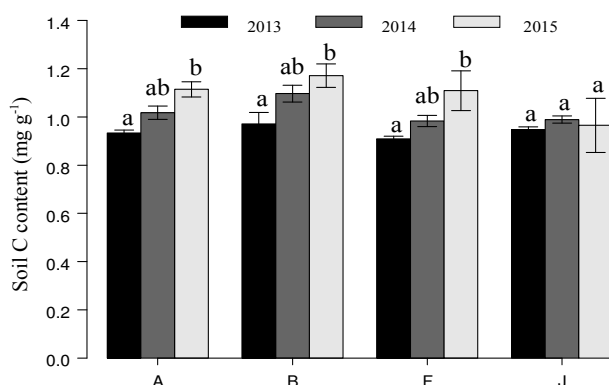


Figure 20 : Teneur en carbone total du sol pour l'association blé/féverole (A), blé pure (B), féverole pure (F) et jachère (J) durant les trois années de culture 2013, 2014 et 2015. Moyens et SE pour douze répétitions récoltées à 130 jours après le semis. Pour chaque année, les valeurs moyennes étiquetées avec les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes à $p < 0,05$.

III.5. Effet des systèmes de culture sur les teneurs en carbone de la biomasse microbienne :

Dans le but de comprendre les mécanismes régissant la dégradation de la matière organique du sol, une évaluation des teneurs en carbone de la fraction microbienne du sol est effectuée. L'analyse de la variance à deux facteurs montre un effet très hautement significatif du système de culture ($p = 2,6.10^{-12}$), de la saison de culture ($p = 1,6.10^{-7}$) ainsi que l'interaction système de culture/saison de culture ($p = 3,9.10^{-4}$).

Les résultats de la figure 21 montrent que les teneurs en carbone de la biomasse microbienne sont plus élevées en association et en féverole pure lors de la saison 2013; cette augmentation est estimée à 14 % et 26 % par rapport au blé pur et à la jachère. Après la première rotation il s'avère que les teneurs en carbone de la biomasse microbienne sont plus élevées en association par rapport aux

autres systèmes de culture et on note également un équilibre entre les parcelles de blé et de féverole où les teneurs ne sont pas significativement différentes (27,1 et 27,5 mg g⁻¹ pour le blé et la féverole dans la rotation respectivement) ; dans ce contexte nous notons aussi la même cinétique lors de la saison culturale 2015 où les teneurs en carbone ne sont pas significativement différentes entre le blé et la féverole dans la rotation bisannuelle (31,8 et 31,1 mg g⁻¹ respectivement), les plus haute teneurs sont notées chez l'association blé/féverole avec 30,7 et 38,7 mg g⁻¹ en 2014 et 2015 respectivement. De la figure 21, il ressort également que les plus faibles teneurs sont constatées pour la jachère et ceci lors des trois saisons de culture (23,3, 23,3 et 22,8 mg g⁻¹ en 2013, 2014 et 2015 respectivement).

Par ailleurs, nous remarquons une augmentation significative des teneurs en C au cours des trois années de culture pour l'association, le blé et la féverole dans la rotation bisannuelle ; cette augmentation dans le temps est respectivement de l'ordre de 32 %, 21 % et 9,5 %. Contrairement aux parcelles mises en culture la jachère n'a montré aucune augmentation significative du C dans le temps.

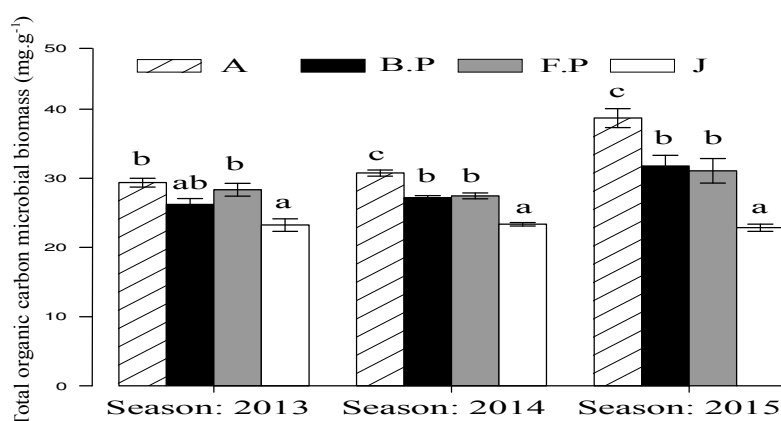


Figure 21 : Teneur en carbone de la fraction microbienne pour l'association blé/féverole (A), Blé pure (B.P), féverole pure (F.P) et jachère (J) durant les trois années de culture 2013, 2014 et 2015. Moyennes et SE pour douze répétitions récoltées à 130 jours après le semis. Pour chaque année, les valeurs moyennes étiquetées avec les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes à $p < 0,05$.

III.6. Relation entre le carbone nodulaire et le carbone de la fraction microbienne :

La figure 22 montre des relations significatives entre le carbone nodulaire et le carbone de la fraction microbienne du sol. Cette relation a été estimée par la pente de régression, c'est-à-dire la dérivée de $CBM = f(Cn)$, comme décrit dans le chapitre II : Objectifs et stratégie de recherche.

L'analyse de la covariance a montré un effet significatif sur cette pente entre les deux systèmes de culture ($p = 0,0012^{**}$).

De ce fait, la corrélation entre Cn et CBM dépend strictement du système de culture, où nous constatons un meilleur coefficient de corrélation sous l'effet de l'association blé/féverole ($R^2 = 0,87^{***}$) en comparaison avec la rotation bisannuelle ($R^2 = 0,64^{**}$). La pente de régression linéaire obtenue pour l'association est significativement plus élevée que celle de la rotation bisannuelle (4 vs 1,1 mg NBM mg^{-1}NN , respectivement).

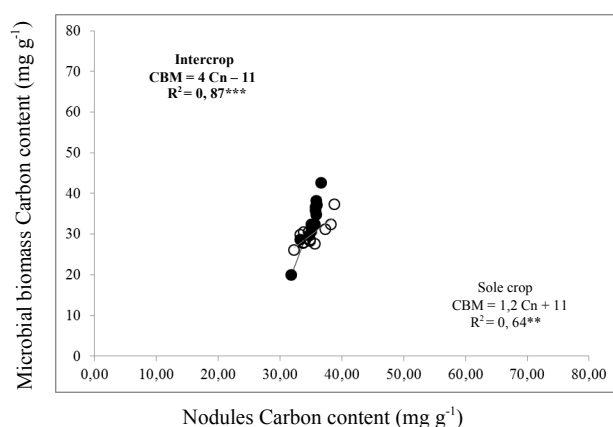


Figure 22 : Carbone de la fraction microbienne en fonction du carbone nodulaire pour les féveroles en monoculture (points blancs) ou en association (points noirs). Les équations sur les graphiques sont les régressions pour les cultures pures (texte gris clair) et les cultures en association (texte gris foncé). Toutes les régressions ont été établies à partir de seize répétitions (seize plantes). Les astérisques *, ** et *** indiquent une signification à $p < 0,05$, $p < 0,01$ et $p < 0,001$, respectivement.

III.7. Evolution de la respiration du sol sous l'effet des deux systèmes de cultures :

La figure 23 montre les flux de C-co₂ émis par la respiration autotrophe et hétérotrophe du sol sous l'effet des deux systèmes de culture à savoir association et rotation bisannuelle blé/féverole au cours du cycle cultural et durant les trois saisons de culture. L'anova à deux facteurs réalisée sur les flux de C-co₂ montre que pour chaque saison de culture ces flux sont significativement affectés par le système de culture et la température du sol. De ce fait, les flux de C-co₂ ne dépendent pas uniquement du système de culture mais pourraient être influencés par la température du sol.

La figure 23 montre une augmentation des flux de C-co₂ entre la période avant floraison de la féverole (DAS = 45 jours) pour atteindre son maximum au stade pleine floraison (DAS = 130 jours) ensuite on note une diminution des flux de C-co₂ entre le stade pleine floraison et le stade avant récolte (DAS = 190 jours), ceci pour les différents systèmes de culture et pour les trois saisons. Cependant, une différence significative entre les deux systèmes de culture et la jachère est

remarquée. En effet, lors des trois saisons, des flux de C-co₂ plus élevés sous l'association, le blé et la féverole dans la rotation bisannuelle en comparaison avec la jachère sont observés.

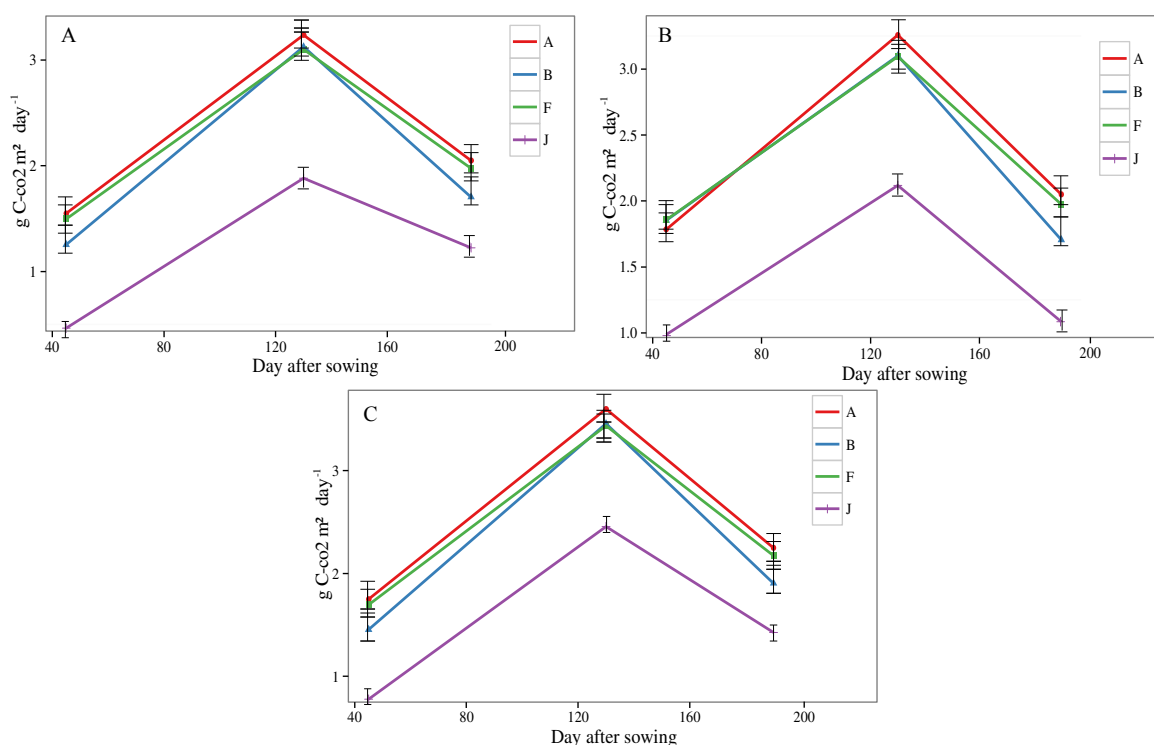


Figure 23 : Flux de C-co₂ émis par le sol dans les différents systèmes de culture et au cours des différents stades végétatifs de la plante lors de la saison 2013 (A), 2014 (B) et 2015 (C). Moyennes et SE pour seize répétitions mesurées à chaque stade végétatif de la plante.

Afin de mieux comprendre l'effet de la température du sol sur les flux de C-co₂, des corrélations entre les flux de C-co₂ et la température du sol pour les trois saisons de culture sont établies (Fig. 24). Le modèle qui s'ajuste le mieux sur nos données est le modèle polynomial avec des coefficients et des pentes de corrélation hautement significatives $R^2 = 0,6$, $R^2 = 0,6$ et $R^2 = 0,7$ respectivement en 2013, 2014 et 2015. Il en découle que la meilleure température du sol pour un maximum de flux de C-co₂ se situe aux environs de 25°C ; cette température correspond à la température du sol au stade végétatif pleine floraison (DAS = 130 jours), ce qui signifie que les flux de C-co₂ sont significativement affectés par la température du sol et que l'optimum se situe aux alentours de 25°C.

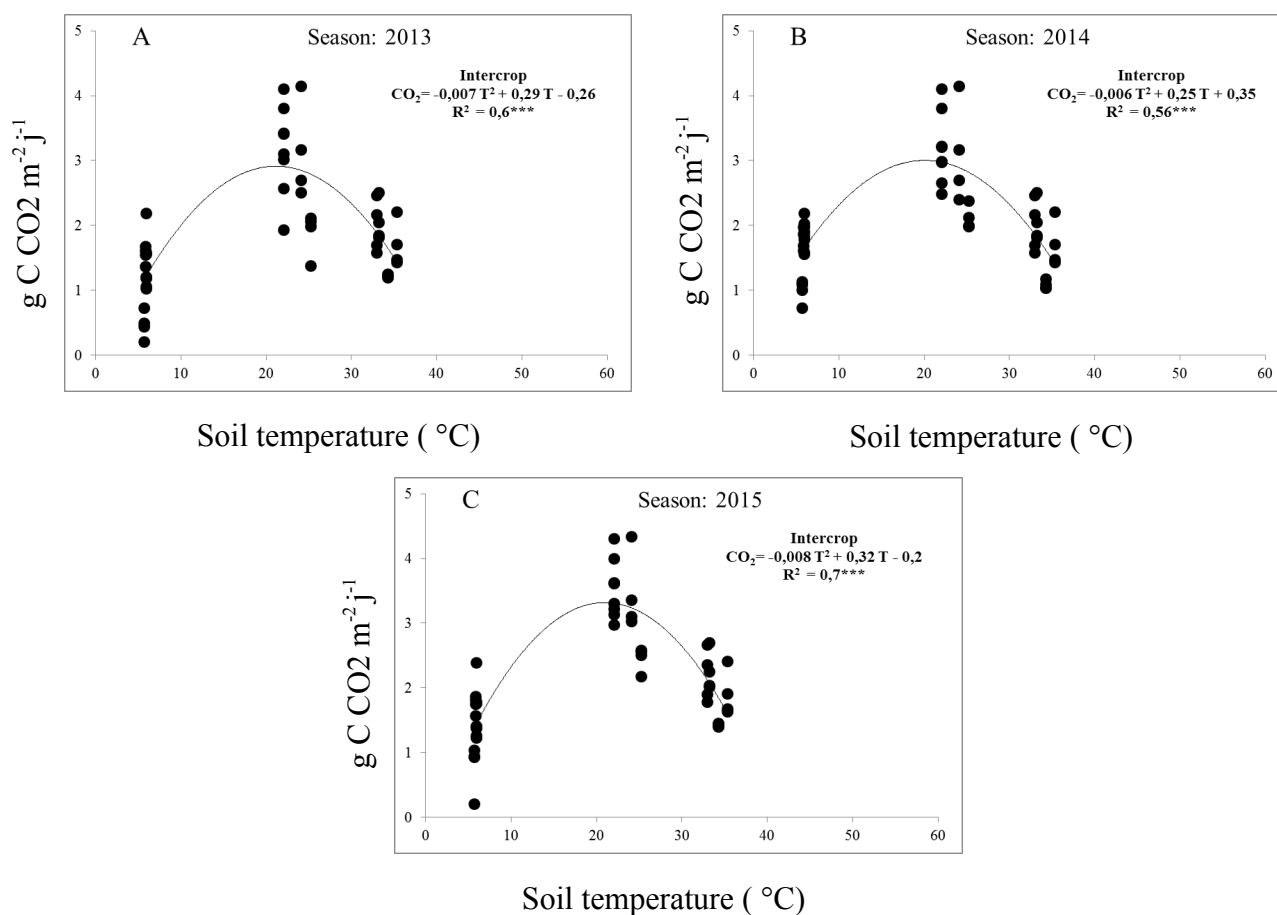


Figure 24 : Flux de CO₂ émis par le sol en fonction de la température du sol pour les quatre systèmes de culture au cours des années 2013 (A), 2014 (B) et 2015 (C). Toutes les régressions ont été établies à partir de quarante-huit répétitions. Les astérisques *, ** et *** indiquent une signification à $p < 0,05$, $p < 0,01$ et $p < 0,001$, respectivement.

IV. Discussion :

Le résultat majeur de cette étude concerne l'activité microbienne du sol, où une augmentation du carbone de la biomasse microbienne du sol a été notée sous l'effet de l'association par rapport aux autres systèmes de culture. Cette augmentation de l'activité microbienne du sol pourrait être due aux exsudats racinaires combinés de la féverole et du blé. Nos résultats montrent aussi une forte corrélation positive entre C_n et CBM sous l'effet de l'association par rapport à la rotation bisannuelle. Ils concordent avec ceux de Tang et al. (2014) qui notent une augmentation des stocks de carbone de la biomasse microbienne sous l'effet de l'association blé dur/ pois chiche et blé dur/lentille comparativement à leur monoculture respective. De même, Latati et al. (2017)

rappellent une augmentation de la biomasse microbienne du sol sous l'effet de l'association maïs/haricot par rapport à leur monoculture.

Un autre résultat marquant de cette étude concerne l'augmentation des teneurs en carbone du sol au cours des saisons de culture sous l'effet de l'association et de la rotation bisannuelle en comparaison avec la jachère. Cette augmentation au cours du temps des teneurs en carbone du sol pourrait être dû à la forte activité microbienne du sol tel que rapporté dans la figure 21. Cette augmentation a déjà été observé différentes régions du monde (eg. Barthes et al. 2006, dans une zone tropicale pour maïs et manioc associés avec le haricot et l'arachide; Dyer et al., 2012 pour l'association maïs et soja; Chapagain and Riseman 2014 pour l'association orge/pois; Scalise et al. 2015 dans l'agroecosysteme du sud d'Italie pour l'association orge et féverole).

Les résultats de cette étude montrent aussi une augmentation des teneurs en carbone sous l'effet du blé dur dans la rotation bisannuelle confirmant ainsi que l'incorporation des résidus de culture dans un sol pauvre en matière organique peut avoir des effets significatifs en terme de séquestration de carbone dans le sol.

Ces deux résultats, nous permettent de conclure que la biomasse microbienne du sol joue un rôle important dans la minéralisation de la matière organique et l'enrichissement du sol en carbone, qui est un élément indispensable au bon développement de la culture. Ibrahim et al. (2016), confirment que la biomasse microbienne du sol est le « chas de l'aiguille » par où passe toute décomposition de la matière organique du sol.

Par ailleurs, la mise en évidence d'une augmentation de la biomasse sèche et des teneurs en carbone du blé sous l'effet de l'association par rapport à la monoculture dans la rotation bisannuelle confortent les résultats de Betencourt et al. (2012) qui montrent une augmentation de la biomasse sèche du blé lorsqu'il est en association avec du niébé dans la même station expérimentale. Latati et al. (2013) ont trouvé aussi une augmentation de la biomasse sèche du maïs en association avec du haricot par rapport à sa monoculture dans l'agroécosystème de Sétif. De même Dahmardeh (2010), constate une augmentation de la biomasse sèche du maïs en association avec l'arachide en comparaison avec sa monoculture. Nos résultats concordent avec d'autres études qui notent une meilleure biomasse sèche du maïs lorsqu'il est associé avec du niébé en comparaison avec la monoculture (Dahmardeh et al. 2013b; Eskandari et Ghanbari 2009; Takim 2012).

Par ailleurs, nous observons une augmentation des rendements et des teneurs en protéines du blé en association par rapport à sa monoculture. Cette augmentation des rendements en blé dans l'association a aussi été rapportée par Huňady and Hochman (2014) qui notent une augmentation

Chapitre IV : Effet de l'association et de la rotation blé/féverole sur le cycle du carbone

des rendements en grain du blé associé à la féverole en comparaison avec sa monoculture. Plusieurs études confirment que les rendements du maïs et du blé sont significativement plus élevés lorsqu'ils sont en association avec le haricot, le niébé, le soja et la féverole (Dahmardeh al. 2010; Latati et al. 2013 ; Zhang et Li 2003). De plus, les teneurs en protéines des grains du blé et de la féverole sont significativement plus élevées en association par rapport à la monoculture dans la rotation bisannuelle. Ces résultats sont en concordance avec ceux d'une autre étude qui signale une augmentation des teneurs en protéines des graines de blé et de pois en association comparativement à leur monoculture respective (Bedoussac et Justes 2010). Eskandari et Ghanbari (2009) notent une augmentation de la teneur en protéine du maïs associé au niébé en comparaison avec le maïs en monoculture.

Les mesures de C-co₂ émis par le sol ont permis d'observer une plus forte émission de C-co₂ sous l'effet de l'association et de la rotation bisannuelle en concordance avec les résultats de Ibrahim et al. (2016) qui notent une forte émission de C-co₂ sous l'effet de l'association blé/féverole. Nos résultats montrent aussi que les plus fortes émissions de C-co₂ se produisent au stade pleine floraison de la féverole. Ce stade est généralement considéré comme la période où la fixation symbiotique de l'azote et l'activité des nodules sont au maximum, et pourrait avoir une répercussion sur l'augmentation des émissions de C-co₂ sous l'effet de l'association et de la féverole. Cependant, une augmentation des flux de C-co₂ sous l'effet du blé en rotation bisannuelle est également observée. .

Afin de comprendre par quel mécanisme s'effectue l'augmentation des flux de C-co₂ sous l'effet de blé et de la jachère, une analyse des températures du sol a été réalisée. La corrélation des deux paramètres (température du sol et flux de C-co₂) montre un effet significatif de la température sur ces flux. Nos résultats concordent avec ceux de Dornbush et Raich (2006) qui notent un effet significatif de la température sur les flux de C-co₂ et une forte corrélation entre la température et ces flux.

V. Conclusion:

Après une expérimentation de trois années sur le terrain, les principaux résultats de cette étude montrent que le système de culture en association augmente l'activité microbienne du sol induisant ainsi une forte corrélation entre Cn et CBM. Cette dernière est considérée comme un mécanisme important dans la minéralisation et la dégradation de la matière organique du sol. L'augmentation de l'activité microbienne du sol a une répercussion majeure sur la séquestration du carbone dans le sol. L'augmentation des teneurs en carbone du sol se produit systématiquement après l'introduction de la féverole dans le système de culture soit en association ou en rotation bisannuelle.

De plus, cette étude confirme que l'association blé/féverole augmente la biomasse sèche et les teneurs en carbone du végétal sous l'effet de l'association par rapport à la monoculture dans la rotation bisannuelle. Cette augmentation de la biomasse a une incidence directe sur les rendements du blé et sur la qualité des grains. Nous avons constaté que l'association blé/féverole augmente les rendements en grain du blé ainsi que les teneurs en protéines des grains de blé et de féverole.

Par ailleurs, l'introduction de la féverole dans le système de culture a un effet significatif sur les flux de C-co₂ du sol. Nos résultats suggèrent que l'augmentation des flux n'est pas uniquement liée à l'introduction de la légumineuse mais aussi à la température du sol et nous permettent de conclure que : i) l'introduction d'une légumineuse dans le système de culture soit en association ou en rotation augmenterait les flux de C-co₂ via l'activité nodulaire et exsudats racinaires ; ii) la température du sol tend à augmenter les flux de C-co₂ ; iii) la température optimale pour un maximum de flux se situe aux alentours de 25°C.

Enfin, ce travail nous procure plus d'évidences et d'arguments pour réduire les apports anarchiques et abusifs des intrants chimiques dans les systèmes de culture intensifs, et à reconsidérer certaines pratiques culturelles telles que les rotations céréale/jachère largement répandue dans les systèmes de culture algériens. L'intégration des associations céréale-légumineuse dans les systèmes de culture ne peut que favoriser la céréale en terme de biomasse, de rendement, de qualité de production, mais aussi favoriser la restitution et le maintien de la fertilité des sols via la séquestration de carbone.

Références bibliographiques :

- Balesdent J., Arrouays D. 1999. An estimate of the net annual carbon storage in French soils induced by land use change from 1900 to 1999. *C R Acad Agri.* 85:265–277.
- Barthes B., Azontonde A., Blanchart E., Girardin C., Villenave C., Oliver R., Feller C. 2006. Effect of a legume cover crop on carbon storage and erosion in an ultisol under maize cultivation in southern Benin. In: *Soil Erosion and Carbon Dynamics*, Roose E.J., Rattan L., Feller C., Barthes B., Stewart B.A. (eds.). Boca Raton, CRC Press, pp. 143–155.
- Bedoussac L., Journet E. P., Hauggaard-Nielsen H., Naudin C., Corre-Hellou G., Jensen E.S., Prieur L., Justes E. 2015. Ecological principles underlying the increase of productivity achieved by cereal-grain legume intercrops in organic farming. A review. *Agron Sustain Dev.* 35:911-935.
- Betencourt E., Duputel M., Colomb B., Desclaux D., Hinsinger P., 2012. Intercropping promotes the ability of durum wheat and chickpea to increase rhizosphere phosphorus availability in low P soil. *Soil Biol Biochem.* 46:21–33.
- Challinor A.J., Koehler A.K., Ramirez-Villegas J., Whitfield S., Das B. 2016. Current warming will reduce yields unless maize breeding and seed systems adapt immediately. *Nat Climate Change.* 6:954–958.
- Chapagain, T., Riseman, A., 2014. Barley–pea intercropping: Effects on land productivity, carbon and nitrogen transformations. *Field Crops Res.* 166, 18-25.
- Cong W.F., Hoffland E., Li L., Six J., Sun J.H., Bao X.G., Zhang F.S., Van Der Werf W. 2014. Intercropping enhances soil carbon and nitrogen. *Glob Change Biol.* 21:1715–1726.
- Dahmardeh M., Ghanbari A., Syahsar B.A., Ramrodi M. 2010. The role of intercropping maize (*Zea mays* L.) and cowpea (*Vigna unguiculata* L.) on yield and soil chemical properties. *Afri J Agric Res.* 5: 631–636.
- Dornbush M E., Raich, J.W. 2006. Soil temperature, not aboveground plant productivity, best predicts intra-annual variations of soil respiration in central Iowa grasslands. *Ecosystems*, 9: 909-920.
- Dyer L., Oelbermann M., Echarte L. 2012. Soil carbon dioxide and nitrous oxide emissions during the years from temperate maize–soybean intercrops. *J Plant Nut Soil Sci.* 175:394–400.
- Eskandari H., Ghanbari, A. 2009. Intercropping of maize (*Zea mays*) and cowpea (*Vigna sinensis*) as whole-crop forage: effect of different planting pattern on total dry matter production and maize forage quality. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca.* 37:152-156.

- Huňady I., Hochman M. 2014. Potential of legume-cereal intercropping for increasing yields and yield stability for self-sufficiency with animal fodder in organic farming. *Czech J Gen Plant Breed.* 50: 185–194.
- Ibrahim H., Pansu M., Blavet D., Hatira A., McDonald P., Bernoux M., Drevon J-J. 2016. Modelling the continuous exchange of carbon between living organisms, the soil and the atmosphere. *Plant Soil.* 398:381-397.
- IPCC (2007): *Climate Change 2007: Synthesis Report.* 2007. In: Pachauri R.K., Reisinger A. (eds.): *Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Geneva, Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Lal R. 2016. Beyond COP 21: potential and challenges of the “4 per Thousand” initiative. *J Soil Water Conserv.* 7: 20–25.
- 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.* 1:1–7.
- Latati M., Aouiche A., Tellah S., Laribi A., Benlahrech S., Kaci G., Ouarem F., Ounane S.M. 2017. Intercropping maize and common bean enhances microbial carbon and nitrogen availability in low phosphorus soil under Mediterranean conditions. *Eur J Soil Biol.* 80: 9-18.
- Moureaux C., Bodson B., Aubinet M. 2008. Mesure des flux de CO₂ et bilan carboné de grandes cultures : état de la question et méthodologie. *Biotechnol Agron Soc Environ.* 12:303-315.
- Müller C., Cramer W., Hare W.L., Lotze-Campen H. 2011. Climate change risks for African agriculture. *Proc Natl Acad Sci.* 108: 4313–4315.
- Pellerin S, Bamière, L., Angers D., Béline F., Benoit M., Butault J. P., Doreau, M. 2013. Quelle contribution de l’agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre? Potentiel d’atténuation et coût de dix actions techniques. Synthèse d’étude. Paris : Inra, 92 p.
- Scalise A., Tortorella, D., Aurelio Pristeri., Petrov B., Gelsomino A., Lindstrom K., Monti M., 2015. Legume-barley intercropping stimulates soil N supply and crop yield in the succeeding durum wheat in a rotation under rained conditions. *Soil Biol Biochem.* 89, 1-12.
- Schneider A., Huyghe C. 2015. Les légumineuses pour des systèmes agricoles et alimentaires durables. Versailles : Éditions Quae, 473 p.
- Scott, J.T., Cotner, J.B., LaPara, T.M., 2012. Variable stoichiometry and homeostatic regulation of bacterial biomass elemental composition. *Front Microbiol.* 3, 1-8.

Chapitre IV : Effet de l'association et de la rotation blé/féverole sur le cycle du carbone

- Smith P., Bustamante M., Dong H., Elsiddig E.A., Haberl H., Harper R., House J., Jafari M., et al. 2014. Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU). In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: Edenhofer O, et al., eds. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Sultan B., Gaetani M. 2016. Agriculture in West Africa in the twenty-first century: climate change, impact scenarios and potential for adaptation. *Front Plant Sci.* 7: 12-62.
- Takim, F.O. 2012. Advantages of maize-cowpea intercropping over sole cropping through competition indices. *J Agricu Biodiv Res.* 1:53-59.
- Tang X., Bernard L., Brauman A., Daufresne T., Deleporte P., Desclaux D., Souche S., Placella S.A., Hinsinger P. 2014. Increase in microbial biomass and phosphorus availability in the rhizosphere of intercropped cereal and legumes under field conditions. *Soil Biol Biochem.* 75: 86-93.
- Verma RK., Yadav A., Rahman L., Kalra A., Patra DD. 2014. Influence the status of soil chemical and biological properties by intercropping. *Int J Recycl Org Waste Agricult.* 3:46-52.
- Zhang F.S., Li L. 2003. Using competitive and facilitative interactions in intercropping systems enhances crop productivity and nutrient-use efficiency. *Plant Soil.* 248: 305–312.

I. Introduction :

Jusqu'à présent, l'optimisation de la production des agroécosystèmes repose principalement sur l'utilisation intensive des engrais bien que la durabilité d'une telle pratique est de plus en plus menacée (Tilman et al. 2002 ; Vance 2001). La synthèse des engrais chimiques demande beaucoup d'énergie en plus de la limitation des matières premières qui servent à leur fabrication. En effet, les engrais phosphatés proviennent des roches phosphatées minées qui sont une ressource épuisable. Les réserves dans le monde se raréfient et on prédit une réduction de 50% dans une trentaine d'année..

Il est également reconnu que l'utilisation massive des engrais phosphatés a un impact négatif sur la qualité des écosystèmes aquatiques. Le lessivage de P provoque en effet, l'eutrophisation des eaux. Par conséquent, de nouvelles alternatives sont nécessaires pour mieux exploiter les ressources du sol tout en respectant l'environnement (Richardson et al. 2011).

L'association de cultures offre des avantages fréquemment observés sur la croissance et la productivité des cultures par rapport aux systèmes conventionnels basés sur la monoculture. Son intérêt réside dans les bénéfices émanant des interactions entre les plantes et de la diversité fonctionnelle de leur rhizosphère (Willey 1979a, Ofori et Stern 1987, Hauggaard-Nielsen et Jensen 2005).

Ces associations ont L'association céréales-légumineuses a été particulièrement encouragées pour son effet bénéfique sur la nutrition azotée (N), mais des études récentes ont rapporté aussi des effets similaires pour nutrition phosphatée. (Li et al. 2007; Hinsinger et al. 2011a). Plusieurs auteurs indiquent une augmentation de la biodisponibilité du P sous l'effet de l'association pois chiche/blé dur comparativement à leurs monocultures respective en milieu contrôlé (Betencourt et al. 2012; Devau et al. 2011). De plus, Latati et al., 2014 signalent une augmentation des teneurs en P assimilable dans la rhizosphère du maïs en association avec le niébé par rapports aux monocultures dans l'agrosystème de Setif. Li et al. (2016) constatent aussi une augmentation de la disponibilité du P sous l'effet de l'association maïs/arachide par rapport à leurs monocultures respective.

L'augmentation de la disponibilité de P dans le sol est expliquée par l'acidification de la rhizosphère des légumineuses (Betencourt et al. 2012). Dans les sols pauvres en phosphore, l'acidification de la rhizosphère peut améliorer la disponibilité du phosphore pour les légumineuses comme le haricot commun (Alkama et al. 2009, 2012). Par ailleurs, l'acidification de la rhizosphère peut être liée aussi à une absorption plus élevée de cations que d'anions (Tang et al. 2004 ; Hinsinger et al. 2003, Alkama et al. 2009). D'après Tang et al. (1997), les légumineuses qui fixent l'azote, absorbent

généralement plus de cations que d'anions et extrudent donc proportionnellement plus de H^+ que d' OH^- pour compenser les charges électriques positives et réguler le pH dans les cellules végétales.

L'acidification de la rhizosphère des légumineuses par l'exsudation racinaire des acides organiques, des carboxylates et des phosphatases est aussi associée à la fixation de l'azote atmosphérique. Elle se traduit par une meilleure dissolution des minéraux phosphatés et une augmentation de la disponibilité en P (Hinsinger et al. 2011b ; Lambers et al. 2006 ; Vance et al. 2003). Le pois cajan intercalé, par exemple, libère des acides organiques dans le sol qui solubilisent des quantités significatives de P du complexe de phosphate de fer (Otani et al. 1996). Le même processus a également été étudié chez d'autres légumineuses telles que le lupin blanc, la fève ou le pois chiche (Cu et al. 2005 ; Li et al. 2009, Li et al. 2004 ; Marschner et al. 1986). Li et al. (2009) ont démontré que la culture intercalaire facilitait significativement l'absorption indirecte de P.

Dans ce contexte générale de diminution des fertilisants phosphatés et de réduction de la pollution, ce chapitre est consacré à comparer l'association et la rotation bisannuelle du blé dur (*Triticum durum* cv. LA1823) et de la féverole (*Vicia faba* cv Diva) dans les conditions méditerranéennes du sud de la France sur une période de trois ans. L'objectif majeur de cette étude était de voir dans quelle cette association blé-féverole pouvait être plus bénéfique que la rotation bisannuelle pour l'acquisition du P et quel serait son effet sur les teneurs du P organique du sol ainsi que l'efficacité d'utilisation du P.

II. Matériel et Méthodes :

II.1. Site et dispositif expérimental :

Cette partie a été décrite et détaillée dans le chapitre II : Objectifs et stratégie de recherche.

II.2. Échantillonnage des plantes et du sol rhizosphérique :

Cette partie a été décrite et détaillée dans le chapitre II : Objectifs et stratégie de recherche.

II.3. Dosage du phosphore dans la plante:

Afin de doser le P végétal, une minéralisation des racines et des feuilles broyées au préalable à $2\mu m$ doit se faire par four micro-ondes dans des réacteurs fermés de 100 mL.

La méthode consiste à faire passer en solution le végétal introduit dans les réacteurs. Pour ce faire, la solution de minéralisation utilisée est de l'acide nitrique concentré à 65% (Nitric acid puriss 84380 Sigma par exemple). L'attaque se réalise dans des mini réacteurs fermés pouvant supporter des pressions de l'ordre de 110 bars. Après une montée en température à $180^\circ C$ en 5 minutes, cette dernière est maintenue durant 10 minutes. Le cycle de minéralisation dure seulement 15 minutes,

mais le temps de refroidissement est d'environ 40 minutes (délai nécessaire avant de pouvoir ouvrir les réacteurs).

Le dosage se fait par colorimétrie après avoir formé un complexe phosphomolybdique (1er réactif) associé au vert malachite (2ème réactif). La réaction est alors fixée avec du Polyvinylalcool (PVA) et l'absorbance est mesurée à 630 nm.

II.4. Dosage du phosphore dans le sol:

La méthode consiste à extraire le phosphore du sol puis à le mesurer par colorimétrie grâce à la méthode au vert de Malachite.

II.5. Efficacité d'utilisation du Phosphore :

L'efficacité d'utilisation du phosphore par la plante est calculé à partir du ratio entre la biomasse sèche totale de la plante et la concentration totale de la plante en P (Drevon, 2017).

II.6. Analyse statistique :

Afin de comparer les effets du système de culture et de l'année sur la biomasse sèche des plantes, la teneur en carbone de la biomasse microbienne, du sol et de la plante, des analyses de variance à un et deux facteurs (Anova) ont été réalisées à l'aide du logiciel R (R Core team 2016). Les moyennes ont ensuite été hiérarchisées en utilisant les tests de comparaison multiple de Tukey à $p = 0,05$.

III. Résultats:

III.1. Teneur en Phosphore de la plante:

L'anova à deux facteurs explicite un effet significatif de système de culture sur les teneurs en P de la partie aérienne du blé ($p = 4,64.10^{-4}$) et de la féverole ($p = 3,66.10^{-3}$) (Fig.29 A et B).

La figure 25A, montre une augmentation significative des teneurs en phosphore de la partie aérienne du blé en association avec la féverole comparativement au blé dans la rotation bisannuelle. Elle est de l'ordre de 25,6 % et 15,7 % respectivement en 2014 et 2015. La figure 25B montre également une augmentation significative de la teneur en phosphore de la partie aérienne de la féverole cultivée en association en 2014 et 2015 de l'ordre de 14,3% et 19,5 % respectivement par rapport à la féverole en monoculture dans la rotation bisannuelle.

D'autre part, l'anova à deux facteur montre un effet hautement significatif du système de culture sur les teneur en P de la partie racinaire du blé ($p = 1,8.10^{-3}$) et de la féverole ($p = 9.10^{-3}$). Cependant aucun effet de la saison de culture ni de l'interaction système de culture/saison de culture n'est noté.

La figure 25C et D, montre une augmentation significative de la teneur en phosphore de la partie racinaire du blé et de la féverole en association par rapport à leur monoculture respective. Elle montre aussi une augmentation des teneurs en P de la partie racinaire du blé de l'ordre de l'ordre de

Chapitre V : Effet de l'association et de la rotation blé/féverole sur le cycle du phosphore

15 % et 17,5 % et de la partie racinaire de la féverole de 13,3 % et 12,1 % respectivement en 2014 et 2015.

De plus, l'anova à deux facteurs réalisé sur les teneurs en P des nodules montre un effet hautement significatif du système de culture ($p = 4,25.10^{-3}$). Une augmentation de l'ordre de 17 % et 25 % est constatée pour la féverole associée par rapport à sa monoculture respectivement en 2014 et 2015 (Fig. 25E).

Parallèlement, l'analyse de la variance à deux facteurs montre un effet très hautement significatif du système de culture sur les teneurs en phosphore de la plante entière pour le blé ($p = 1,7.10^{-4}$) et la féverole ($p = 2,25.10^{-4}$).

A partir des figures 25F et G on constate une augmentation des teneurs en P de la plante entière du blé et de la féverole en association par rapport à leur monoculture respective. Cette augmentation est estimée à 22 % et 17 % pour le blé, et à 12,5 % et 15,6 % pour la féverole en 2014 et 2015 respectivement.

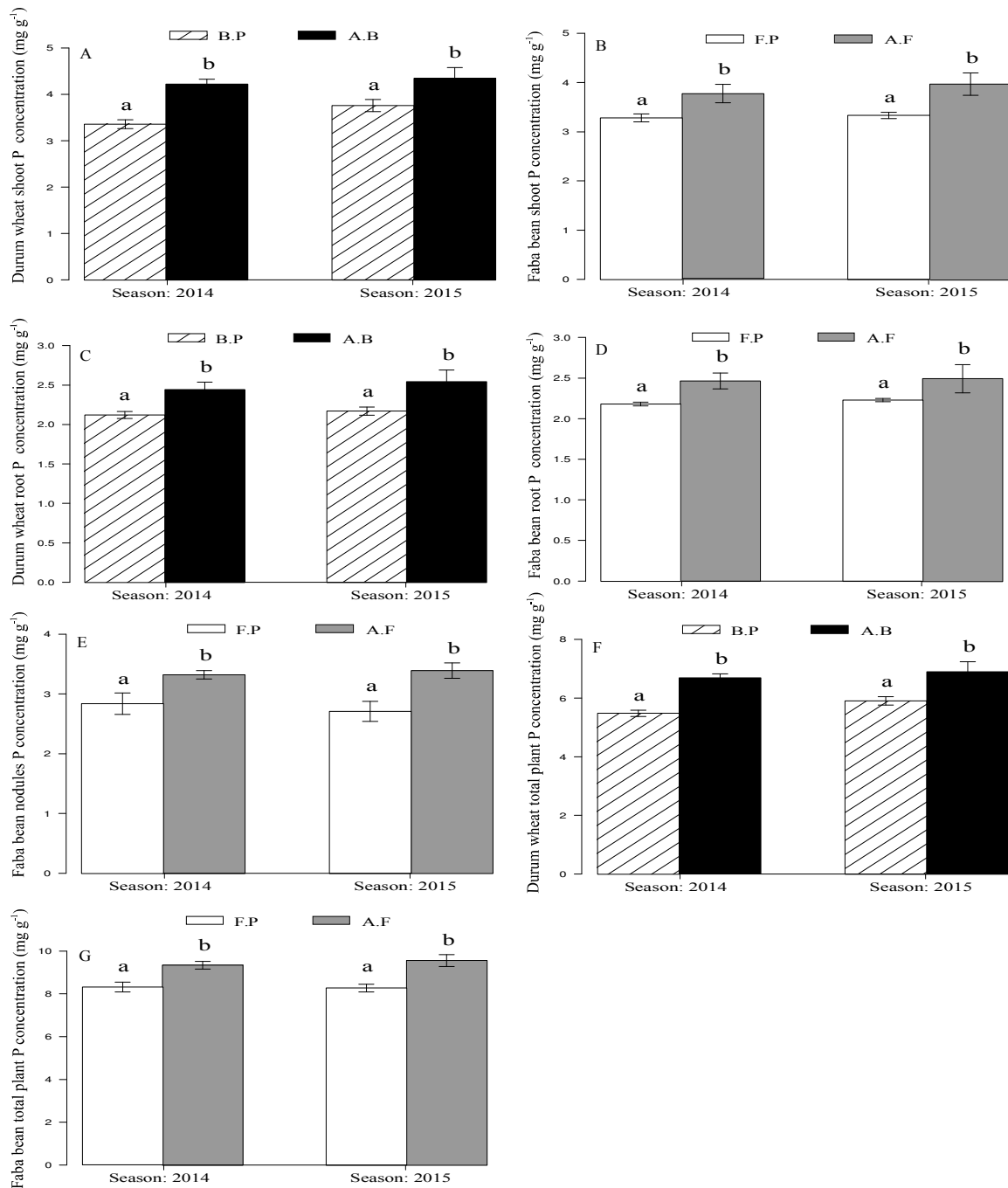


Figure 25 : Teneur en phosphore, de la partie aérienne du blé (A) et de la féverole (B), de la partie racinaire du blé (C) et de la féverole (D), des nodules (E), ainsi que la teneur en P totale de la plante pour le blé (F) et pour la féverole (G). Moyennes et SE pour seize répétitions récoltées à 130 jours après le semis. Pour chaque année, les valeurs moyennes étiquetées avec les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes à $p < 0,05$. FP = Féverole pure, AF = Association féverole, BP = Blé pure et AB = Association blé.

III.2. Efficacité d'utilisation du Phosphore (EUP):

L'analyse de la variance à deux facteurs montre un effet très hautement significatif du système de culture sur l'EUP du blé ($p = 2,11.10^{-6}$) mais aucun effet de la saison de culture n'est signalé, cependant l'EUP de la féverole n'a pas été affecté ni par le système de culture ni par la saison de culture.

La figure 26A montre une augmentation significative de l'EUP du blé sous l'effet de l'association de 86 % et 91 % par rapport à la monoculture dans la rotation bisannuelle respectivement en 2014 et 2015. Cependant, aucune augmentation significative n'est à signaler pour la féverole lors des deux saisons de culture (Fig. 26B).

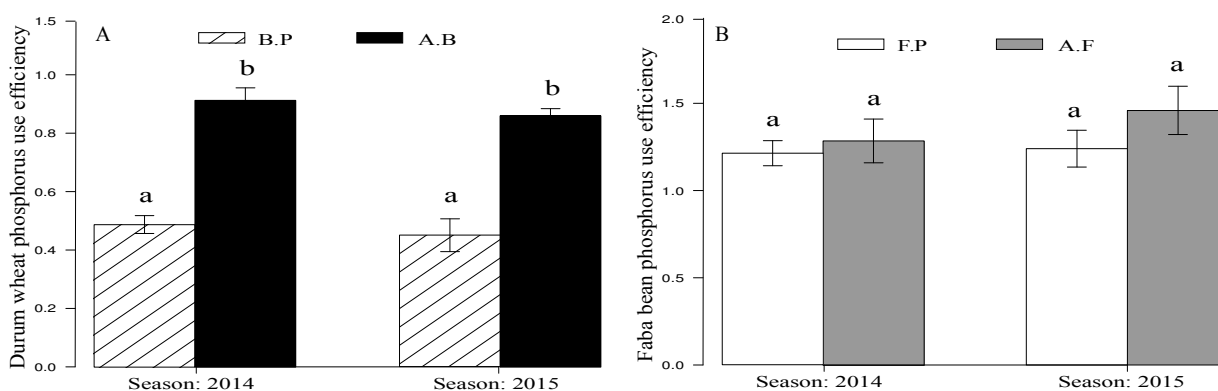


Figure 26 : Efficacité d'utilisation du phosphore (EUP) du blé dur (A) et de la féverole (B).

Moyennes et SE pour seize répétitions récoltées à 130 jours après le semis. Pour chaque année, les valeurs moyennes étiquetées avec les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes à $p < 0,05$. B.P = Blé pure, A.B = Association blé, F.P = Féverole pure et A.F = Association féverole.

III.3. Olsen-P Total et assimilable du sol :

L'analyse de la variance à deux facteurs montre un effet significatif du système de culture ($p = 4,24.10^{-8}$) et de la saison de culture ($p = 1,2.10^{-3}$) sur le phosphore assimilable du sol, cependant aucun effet significatif n'est signalé sur le phosphore total du sol.

Nous remarquons que les plus grandes teneurs en P assimilable sont notées sous l'effet de l'association que ce soit en 2014 ($p_i = 53,27$ mg/g) ou en 2015 ($p_i = 55,27$ mg/g) par rapport aux autres systèmes de culture (Fig. 27B). De plus, la rotation bisannuelle blé/féverole se démarque par rapport au témoin jachère avec des teneurs en P assimilable plus élevé de 12 % en 2014 et en 2015. Les teneurs les plus faibles en P assimilable sont enregistrées sous la jachère en 2014 ($p_i = 42,94$ mg/g) et 2015 ($p_i = 45,44$ mg/g).

Cependant, la figure 27A ne montre aucune différence significative entre les différents systèmes de culture en terme de teneur en phosphore total du sol au cours des deux saisons de cultures

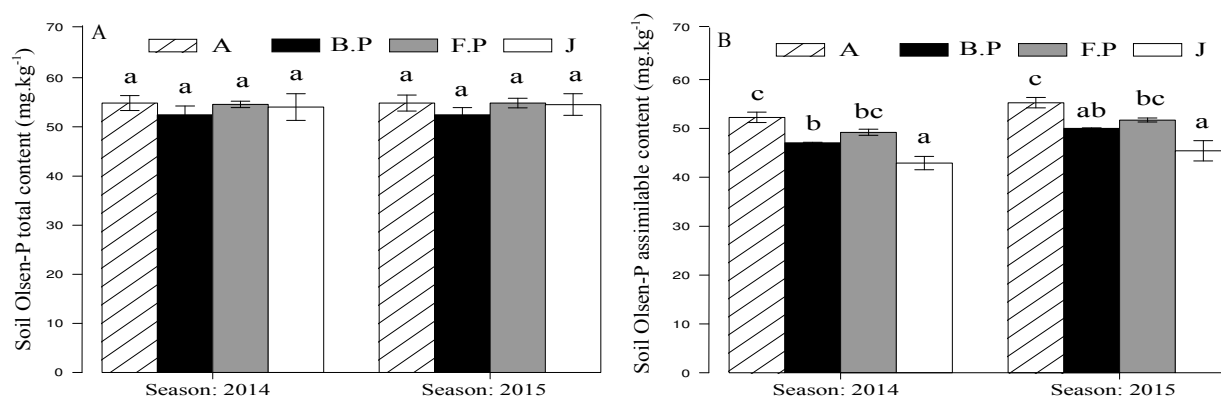


Figure 27 : Teneur en Olsen-P total (A) et Olsen-P assimilable (B) du sol au cours des deux saisons de culture 2014 et 2015. Moyennes et SE pour douze répétitions récoltées à 130 jours après le semis. Pour chaque année, les valeurs moyennes étiquetées avec les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes à $p < 0,05$.

IV. Discussion :

Le phosphore est considéré comme un des éléments les plus importants en agriculture après l'azote. Sa déficience dans le sol constitue un facteur limitant majeur des cultures. De ce fait les apports d'engrais phosphatés largement répandus en agriculture, pour répondre aux besoins des cultures, sont responsables de plusieurs pollutions notamment l'eutrophisation des eaux.

Dans ce contexte, notre travail s'inscrit dans l'élaboration des systèmes de culture à bas intrants chimiques. Les résultats obtenus montrent que l'association céréale-légumineuse est plus avantageuse en terme de croissance des plantes et de production. Ils appuient l'hypothèse « *les légumineuses au service de l'écologie* », L'association blé-féverole se démarque comme étant le système de culture le plus efficace en terme d'efficacité d'utilisation du phosphore, mais aussi, le plus efficace pour améliorer les teneurs en P assimilable du sol.

Tel que montré dans la figure 29, les plus forte teneurs en P dans les différentes parties du végétal sont notées sous l'association blé/féverole par rapport à leur monoculture respective. Nos résultats concordent avec ceux de Latati et al. (2016a) qui constatent une augmentation des teneurs en P de la partie aérienne et racinaire du maïs associé au haricot comparativement à sa monoculture.

Parallèlement aux teneurs en P du végétal, le blé sous l'effet de l'association se distingue comme étant plus efficace en P par rapport à sa monoculture. Cet effet signifie une meilleure production de biomasse par unité de P consommé. (Vadez et Drevon 2001)

D'autre part, nos résultats montrent une solubilisation de P plus élevée sous l'effet de l'association blé/féverole par rapport aux autres systèmes de culture (Fig.31). Cette forte solubilisation de P sous l'association pourrait être induite via l'acidification de la rhizosphère par exsudation d'acide organique et de protons au cours de la fixation symbiotique de l'azote par les racines de la féverole. Nos résultats concordent avec ceux de Latati et al. (2016a), qui montrent de plus fortes teneurs en P assimilable sous association maïs/haricot par rapport à leur monoculture respective. Par ailleurs Wang et al.(2015) montrent une plus forte solubilisation de P sous l'effet de l'association blé/féverole et maïs/féverole par rapport à leurs monocultures et rotations respectives suite à un essai réalisé sur un long terme (dix ans) dans une station expérimentale en Chine (Li et al. 2007 ; Betencourt et al. 2012).

Des études similaires ont montré que les racines de pois d'Angole secrètent de l'acide piscidique et favorisent la libération de P à partir de $FePO_4$ par des chélateurs (Ae et al. 1990). Les racines de lupin secrètent des acides citriques et maliques et augmentent l'absorption de P dans les sols déficients en P (Dakora et Phillips 2002). Par ailleurs, l'activité accrue de la phosphatase dans l'association pois chiche / maïs mobilise le P des formes organiques vers les formes solubles. Ces mécanismes sous-jacents peuvent profiter aux cultures elles-mêmes et aussi aux plantes voisines dont les racines s'entremêlent (Li et al., 2007).

En outre, Li et al. (2009) et Betencourt et al. (2012) ont suggéré que l'association céréale-légumineuse influence indirectement la biodisponibilité du P dans la rhizosphère à travers des activités microbiennes complexes. De plus, dans la rhizosphère d'une association de canne à sucre et de soja, il a été démontré que l'augmentation de P était liée à l'amélioration de la diversité et des activités microbiennes du sol (Li et al., 2010).

V. Conclusion :

Suite à une expérimentation conduite sur deux saisons culturales en plein champs , il s'est avéré que le système de culture en association est plus bénéfique que les monocultures dans la rotation bisannuelle. Dans ce contexte, il apparaît que l'association blé/féverole ait enregistré les plus fortes teneurs en P dans le végétal traduisant ainsi une meilleure efficacité d'utilisation du P. De plus, une solubilisation de P plus élevée sous l'effet de l'association blé/féverole par rapport aux autres systèmes de culture, pourrait correspondre à une meilleure activité microbienne dans le sol sous ce systèmes.

Cette étude apporte plus de preuves quant à l'avantage écologique des légumineuses. L'introduction d'une légumineuse dans le système de culture permettrait d'augmenter la biodisponibilité du P dans le sol *via* l'acidification de la rhizosphère et la stimulation de l'activité microbienne du sol. Ce système de culture apparaît comme étant une bonne alternative aux systèmes de cultures intensifs à fort intrants, car il permettrait de réduire les apports d'engrais chimiques qui sont considérés comme ayant une part non négligeable dans le réchauffement climatique de la planète.

Cependant, il serait intéressant de se pencher sur les mécanismes sous-jacent à cette solubilisation du P dans le sol, en déterminant la part de l'activité microbienne et les mécanismes agissant sur cette activité.

Références bibliographiques :

- Ae N., Arihara J., Okada K., Yoshihara T., Johansen C. 1990. Phosphorus uptake by pigeon pea and its role in cropping systems of the Indian subcontinent. *Science*. 248:477-480.
- Alkama N., Bolou B.I., Bolou E., Vailhe H., Roger L., Ounane S.M., Drevon J.J. 2009. Genotypic variability in P use efficiency for symbiotic nitrogen fixation is associated with variation of proton efflux in cowpea rhizosphere. *Soil Biol Biochem*. 41:1814-1823.
- Alkama N., Ounane G., Drevon J.J. 2012. Is genotypic variation of H⁺ efflux under P deficiency linked with nodule-root respiration of N₂ fixing common-bean (*Phaseolus vulgaris* L.)?. *J Plant Physiol*. 169:1084-1089.
- Betencourt E., Duputel M., Colomb B., Desclaux D., Hinsinger P., 2012. Intercropping promotes the ability of durum wheat and chickpea to increase rhizosphere phosphorus availability in low P soil. *Soil Biol Biochem*. 46:21–33.
- Cu S.T.T., Hutson J., Schuller K.A. 2005. Mixed culture of wheat (*Triticum aestivum* L.) with white lupin (*Lupinus albus* L.) improves the growth and phosphorus nutrition of the wheat. *Plant Soil*. 272:143–151.
- Dakora F.D., Phillips, D.A. 2002. Root exudates as mediators of mineral acquisition in low-nutrient environments. *Plant Soil*. 245:35-47.
- Devau N., Hinsinger P., Le Cadre E., Gerard F. 2011. Root induced processes controlling phosphate availability in soils with contrasted P-fertilized treatments. *Plant Soil*. 348:203-218.
- Hauggaard-Nielsen H., Jensen E.S. 2005. Facilitative root interactions in intercrops. In: *Root Physiology: from Gene to Function*, Hauggaard-Nielsen H., Jensen E.S. (Eds). Springer, Dordrecht. pp. 237-250.
- Hinsinger P., Brauman A., Devau N., Gérard F., Jourdan C., Laclau J-P., Le Cadre E., Jaillard B. 2011a. Acquisition of phosphorus and other poorly mobile nutrients by roots. Where do plant nutrition models fail?. *Plant Soil*. 348:203-218.
- Lambers H., Shane M.W., Cramer M.D., Pearse S.J., Veneklaas E.J. 2006. Root structure and functioning for efficient acquisition of phosphorus: Matching morphological and physiological traits. *Ann Bot*. 98:693-713.
- Latati M., Blavet D., Alkama N., Laoufi H., Drevon J.J., Gérard F., Pansu M., Ounane S.M. 2014. The intercropping cowpea–maize improves soil phosphorus availability and maize yields in an alkaline soil. *Plant Soil*. 85:181–191.

- Latati M., Bargaz A., Belarbi B., Lazali M., Benlahrech S., Tellah S., Kaci G., Drevon J.J., Ounane S.M. 2016a. 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.
- Li B., Li Y.Y., Wu H.M., Zhang F.F., Li C.J., Li X.X., Lambers H., Li L. 2016. Root exudates drive interspecific facilitation by enhancing nodulation and N₂ fixation. *Proceed Nat Ac Sci.* 113: 6496–6501.
- Li H., Shen, J., Zhang F., Marschner P., Cawthray G., Rengel Z. 2009. Phosphorus uptake and rhizosphere properties of intercropped and monocropped maize, faba bean, and white lupin in acidic soil. *Biol Fertil Soils.* 46:79-91.
- Li H., Shen J., Zhang F., Marschner P., Cawthray G., Rengel Z. 2010. Phosphorus uptake and rhizosphere properties of intercropped and monocropped maize, faba bean, and white lupin in acidic soil. *Biol Fertil Soils.* 46:79-91.
- 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. *Proceed Nat Ac Sci.* 104:11192-11196.
- Li S.M., Li L., Zhang F.S., Tang C. 2004. Acid phosphatase role in chickpea/maize intercropping. *Ann Bot.* 94:297-303.
- Marschner H., Römheld V., Horst W.J., Martin P. 1986. Root-induced changes in the rhizosphere: importance for the mineral nutrition of plants. *Z. Für Pflanzenernähr. Bodenkd.* 149:441-456.
- Ofori F., Stern W. R. 1987. Cereal–legume intercropping systems. *Advan agron.* 41:41-90.
- Otani T., Ae N., Tanaka H. 1996. Phosphorus (P) uptake mechanisms of crops grown in soils with low P status: II. Significance of organic acids in root exudates of pigeonpea. *Soil Sci Plant Nut.* 42:553-560.
- Richardson A.E., Lynch J.P., Ryan P.R., Delhaize E., Smith F.A., Smith S.E., Harvey R.P., Ryan M.H., Veneklaas J.E., Lambers H., Oberson A., Culvenor A.R., Simpson R.J. (2011). Plant and microbial strategies to improve the phosphorus efficiency of agriculture. *Plant soil.* 349:121-156.
- Tang C., Mc Lay C.D.A., Barton L. 1997. A comparison of proton excretion of twelve pasture legumes grown in nutrient solution. *Aust J Experi Agric.* 37:563-570.
- Tang C., Drevon J.J., Jaillard B., Souche G., Hinsinger P. 2004. Proton release of two genotypes of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) as affected by N nutrition and P deficiency. *Plant Soil.* 260:59-68.

Chapitre V : Effet de l'association et de la rotation blé/féverole sur le cycle du phosphore

- Tilman D., Cassman K.G., Matson P.A., Naylor R., Polasky S. 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*. 418:671–677.
- Vadez V., Drevon J.J. 2001. Genotypic variability in P use efficiency for symbiotic N₂ fixation in common-bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Agron.* 21:691-699.
- Vance C.P. 2001. Symbiotic nitrogen fixation and phosphorus acquisition. Plant nutrition in a world of declining renewable resources. *Plant Physiol.* 127, 390-397.
- Vance C.P., Uhde-Stone C., Allan D.L. 2003. Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. *New Phytol.* 157:423-447.
- Wang Z.G., Bao X.G., Li W.F., Jin X., Zhao J.H., Sun J.H., Christie P., Li L. 2015. Intercropping maintains soil fertility in terms of chemical properties and enzyme activities on a timescale of one decade. *Plant Soil*, 391: 265-282.
- Willey R. 1979a. Intercropping: its importance and research needs. 1. Competition and yield advantages. *Field Crop Abstr.* 32:1-10.

Conclusion générale et perspectives :

Les travaux présentés dans cette thèse s'inscrivent dans le cadre de l'amélioration de la production des agrosystèmes céréaliers à faible intrants chimiques, en exploitant les bénéfiques écosystémiques des légumineuses. Dans ce contexte, la fixation biologique de l'azote atmosphérique *via* la symbiose Rhizobium-légumineuse est considérée comme un atout majeur du point de vue économique, agronomique et environnemental.

Afin de répondre aux questionnements de notre problématique, la comparaison des deux systèmes a permis de mettre en évidence l'intérêt des cultures associées à plusieurs niveaux de l'agrosystème.

L'association blé/féverole favorise, l'efficacité du fonctionnement de la symbiose rhizobienne (EURS) et l'assimilation du phosphore, induisant ainsi une meilleure nutrition azotée et des teneurs plus élevées en phosphore pour le blé. Ces résultats indiquent que le blé associé domine la compétition interspécifique pour l'absorption de l'azote du sol incitant la féverole à déclencher des mécanismes de compensation pour augmenter la fixation symbiotique de l'azote en réponse à sa réduction dans le sol.

Cette association favorise la stimulation de l'activité microbienne (B.M) de la rhizosphère qui serait en relation avec la nodulation de la féverole avec une forte corrélation entre les teneurs en azote et en carbone nodulaire et microbien.

L'activité microbienne, considérée comme un indice de minéralisation et de décomposition de la matière organique dans le sol peut influencer la séquestration du carbone comme démontré par une augmentation des teneurs en carbone dans le sol de notre essai. De plus, l'association augmente les teneurs en azote et en phosphore assimilable dans le sol *via* la forte activité rhizobienne de la féverole.

Les trois années d'expérimentation ont confirmé le rôle prépondérant de l'activité microbienne dans la séquestration du carbone et de l'association dans l'augmentation des teneurs en azote et en phosphore du sol.

Elles ont aussi permis de corroborer notre hypothèse de travail qui stipulait que l'association blé-féverole pouvait améliorer durablement le rendement et la qualité des récoltes tout en respectant l'environnement par une réduction raisonnée des intrants chimiques.

Au terme de cette étude, nous proposons une alternative à l'intensification conventionnelle, qui fait appel aux principes écologiques en exploitant au mieux les bénéfiques écosystème que procure l'association céréales/légumineuses. Le système blé-féverole répond parfaitement à cette attente et

donne des résultats intéressants qui confortent notre hypothèse de travail. Il demande une attention plus grande pour l'extrapoler à l'échelle multi-sites et pour le faire accepter par les agriculteurs.

En perspective de ce travail, où la maturité des espèces associées n'est pas toujours synchronisée dans le temps, il serait nécessaire de sélectionner des variétés de légumineuses et de céréales à croissance simultanée afin d'optimiser efficacement l'absorption des éléments nutritifs et surtout de faciliter la mécanisation de la récolte.

Tableaux :

Anova à deux facteurs sur la biomasse végétale et le carbone et l'azote du sol. *, ** et *** dénote signifiante à $p < 0.05$, $p < 0.01$ et $p < 0.001$, respectivement. *n.s* = non significatif ($p > 0.05$).

		Variables							
		Wheat Shoot dry weight (g m ⁻²)	Faba bean Shoot dry weight (g m ⁻²)	Faba bean Nodule dry weight (g m ⁻²)	Faba bean Nodules number (nod.pl ⁻¹)	Wheat NNI	Faba bean NNI	Soil C (%)	Soil N (%)
Factors	Growing season (= Year)	0.23 <i>n.s</i>	1.7x10 ⁻⁵ ***	<2x10 ⁻¹⁶ ***	0.5 <i>n.s</i>	3.3x10 ⁻⁰⁷ ***	58x10 ⁻⁵ ***	4x10 ⁻⁴ ***	2.6x10 ⁻⁷ ***
	Cropping system	12x10 ⁻⁵ ***	0.94 <i>n.s</i>	<2x10 ⁻¹⁶ ***	0.4 <i>n.s</i>	1.6x10 ⁻⁰⁹ ***	0.88 <i>n.s</i>	0.05 *	7.5x10 ⁻⁴ ***
	Interaction between growing-Season and cropping system	0.51 <i>n.s</i>	0.15 <i>n.s</i>	0.57 <i>n.s</i>	0.8 <i>n.s</i>	66x10 ⁻⁵ ***	0.21 <i>n.s</i>	0.48 <i>n.s</i>	3.7x10 ⁻⁴ ***

Anova à deux facteurs sur le rendement en grain et la la qualité de la production. *, ** et *** dénote signifiante à $p < 0.05$, $p < 0.01$ et $p < 0.001$, respectivement. *n.s* = non significatif ($p > 0.05$).

		Variables			
		Durum wheat grain yield (t ha ⁻¹)	Faba bean grain yield (t ha ⁻¹)	Durum wheat grain protein (%)	Faba bean grain protein (%)
Factors	Growing season (= Year)	0.62 <i>n.s</i>	0.61 <i>n.s</i>	3.94x10 ⁻¹² ***	0.2 <i>n.s</i>
	Cropping system	7.93x10 ⁻⁵ ***	0.86 <i>n.s</i>	4.73x10 ⁻¹⁴ ***	5.26x10 ⁻⁶ ***
	Interaction between growing-Season and cropping system	0.48 <i>n.s</i>	0.41 <i>n.s</i>	3.53x10 ⁻⁶ ***	0.4 <i>n.s</i>

Anova à deux facteur sur les teneurs en Carbone de la plante. *, ** et *** dénote signifiante à $p < 0.05$, $p < 0.01$ et $p < 0.001$, respectivement. *n.s* = non significatif ($p > 0.05$).

		Variables						
		Faba bean Root C content (mg g ⁻¹)	Faba bean Shoot C content (mg g ⁻¹)	Faba bean Nodule C content (mg m ⁻¹)	Faba bean total C content (mg g ⁻¹)	Wheat Shoot C content (mg g ⁻¹)	Wheat root C content (mg g ⁻¹)	Wheat total C content (mg g ⁻¹)
Factors	Growing season (= Year)	1.6x10 ⁻⁶ ***	3x10 ⁻⁴ ***	9x10 ⁻³ **	2x10 ⁻⁶ ***	0.98 <i>n.s</i>	0.57 <i>n.s</i>	0.6 <i>n.s</i>
	Cropping system	0.6 <i>n.s</i>	4x10 ⁻² *	0.95 <i>n.s</i>	0.5 <i>n.s</i>	1.7x10 ⁻⁸ ***	1.1x10 ⁻⁷ ***	2.9x10 ⁻¹⁰ ***
	Interaction between growing- Season and cropping system	0.5 <i>n.s</i>	0.61 <i>n.s</i>	5x10 ⁻³ **	0.1 <i>n.s</i>	0.94 <i>n.s</i>	0.76 <i>n.s</i>	0.8 <i>n.s</i>

Anova à deux facteur sur les teneurs en Phosphore de la plante. *, ** et *** dénote signifiante à $p < 0.05$, $p < 0.01$ et $p < 0.001$, respectivement. *n.s* = non significatif ($p > 0.05$).

		Variables						
		Faba bean Root P content (mg g ⁻¹)	Faba bean Shoot P content (mg g ⁻¹)	Faba bean Nodule P content (mg m ⁻¹)	Faba bean total P content (mg g ⁻¹)	Wheat Shoot P content (mg g ⁻¹)	Wheat root P content (mg g ⁻¹)	Wheat total P content (mg g ⁻¹)
Factors	Growing season (= Year)	06 <i>n.s</i>	0.4 <i>n.s</i>	0.8 <i>n.s</i>	0.7 <i>n.s</i>	0.7 <i>n.s</i>	0.4 <i>n.s</i>	0.09 <i>n.s</i>
	Cropping system	9x10 ⁻³ **	4x10 ⁻³ **	4x10 ⁻³ **	2x10 ⁻⁴ ***	5x10 ⁻⁴ ***	2x10 ⁻³ **	2x10 ⁻⁴ ***
	Interaction between growing- Season and cropping system	0.9 <i>n.s</i>	0.6 <i>n.s</i>	0.5 <i>n.s</i>	0.6 <i>n.s</i>	0.4 <i>n.s</i>	0.8 <i>n.s</i>	0.6 <i>n.s</i>

Anova à deux facteur sur les teneurs en Phosphore du sol, teneurs en Carbone et en Azote de la biomasse microbienne. *, ** et *** dénote signifiante à $p < 0.05$, $p < 0.01$ et $p < 0.001$, respectivement. *n.s* = non significatif ($p > 0.05$).

Variables				
	PT olsen (mg kg ⁻¹)	Pi Olsen (mg kg ⁻¹)	C B.M (mg g ⁻¹)	N B.M (mg g ⁻¹)
Growing season (= Year)	0.9 <i>n.s</i>	13x10 ⁻³ **	1.6x10 ⁻⁷ ***	1x10 ⁻³ <i>n.s</i>
Cropping system	0.5 <i>n.s</i>	4x10 ⁻⁸ ***	3x10 ⁻¹³ ***	<2x10 ⁻¹⁶ ***
Factors				
Interaction between growing- Season and cropping system	1 <i>n.s</i>	1 <i>n.s</i>	4x10 ⁻⁴ ***	7x10 ⁻⁶ ***

Protocoles :**1. Dosage de l'azote microbien :**

L'azote provenant de la décomposition des corps microbiens tués par des vapeurs de trichlorométhane (ou chloroforme) est extrait par une solution de K_2SO_4 . La quantité d'azote organique d'origine microbienne extrait (E_N) est obtenue par la soustraction de l'azote organique (N_T) extrait du sol témoin non fumigé (azote essentiellement non microbien, solubilisé par K_2SO_4) à l'azote organique total (N_F) extrait du sol fumigé. La biomasse microbienne est proportionnelle à E_N à un facteur kE_N ; kE_C représente la fraction d'azote microbien extractible après fumigation.

- Fumigation :

Cette étape se déroule obligatoirement sous une sorbonne en bon état de fonctionnement dédiée aux solvants. Les résidus de rinçage sont gardés dans le récipient dédiés aux résidus ou déchets chlorés.

- Allumer le groupe de froid.
- Laver à l'eau 3-4 fois 100 ml de trichlorométhane dans l'ampoule à décanter afin de supprimer l'alcool amylique ou amylène qui lui permet de rester stable sous forme liquide.
- Une fois lavé, mettre le trichlorométhane dans un bécher avec quelques petites billes de verre (ou de la pierre ponce) dans le fond du dessiccateur.
- Tapisser le fond du dessiccateur de papier filtre humide ou y mettre une coupelle d'eau pour éviter que les échantillons ne se dessèchent pendant la fumigation.
- Placer les boîtes à tare contenant les échantillons de sol dans le dessiccateur et le fermer.
- Marquer les boîtes à tare avec un crayon gras. Ne pas utiliser des marqueurs dont l'encre se dissout sous les vapeurs de trichlorométhane.
- Brancher le groupe de froid entre le dessiccateur et la pompe à vide (le groupe de froid permet de piéger les vapeurs de trichlorométhane) et mettre le dessiccateur sous vide.
- Lorsque le trichlorométhane bouillonne légèrement, le vide est suffisamment établi. Arrêter alors le processus en faisant les actions suivantes dans l'ordre qui suit :
 - 1) Fermer le robinet du couvercle du dessiccateur.
 - 2) Une minute plus tard, débrancher et boucher le tuyau qui relie le groupe de froid au dessiccateur.,
 - 3) Alors que le groupe froid fonctionne encore, fermer l'arrivée d'eau de la pompe à vide ;,
 - 4) Désolidariser le dessiccateur du groupe de froid et boucher le conduit relié au groupe de froid ;
 - 5) Vider dans le récipient servant à recueillir les résidus ou déchets chlorés le contenu de l'erien

du groupe froid (piège) et le laver à l'eau sous la sorbonne en ayant pris le soin de porter le masque de protection respiratoire et les gants.

6) Après avoir rincé abondamment le piège, ce dernier sera remis dans sa niche.

- Recouvrir le dessiccateur d'un sac plastique noir ou de papier aluminium.
- Laisser le dessiccateur sous vide pendant 16 heures à 20-25° C. Le dessiccateur doit être laissé sous la sorbonne.
- Casser le vide en ouvrant délicatement le robinet du dessiccateur et ouvrir le couvercle.
- Laisser les échantillons dans l'atmosphère de la sorbonne pendant 1/2 - 1 h pour éliminer l'excès de trichlorométhane.

- Extraction :

Pour les échantillons fumigés :

- Peser 5 g de sol.
- Les mettre en contact avec 25 ml de K₂SO₄ à 0,05 N dans un tube conique (rapport sol/extractant : 1/5).
- Agiter pendant 45 mn à température ambiante (20-25° C à l'aide d'un agitateur rotatif).
- Centrifuger à 2683 G (ce qui correspond à 4000 RPM pour la centrifugeuse Jouan GR4i) pendant 10 mn.
- Prélever le surnageant, filtrer à 0,2 µm, placer le surnageant dans des tubes en verre et recouvrir d'un parafilm.

Pour les échantillons non fumigés, suivre le même protocole, mais agiter pendant 1 heure.

- Dosage :

L'azote organique extrait (mg.L-1) est déterminé grâce à un analyseur SHIMADZU type TOC-V.

- Calcul :

Azote microbien extrait (mg N kg-1) = En = NF⁽¹⁾ – NT⁽²⁾ = (mg N L-1 x FN) - (mg N L-1 x F'N').

⁽¹⁾ NF = N organique extrait du sol fumigé.

⁽²⁾ NT = N organique extrait du sol non fumigé.

F'C' = facteur de correction

Facteur de correction = (volume du K₂SO₄ ajouté (en ml) + volume d'eau d'humectation du sol (en ml) / masse de sol sec (en g).

Biomasse microbienne = En/kEn

Lorsque l'azote extrait est dosé après oxydation à haute température ou oxydation chimique (UV/persulfate), Joergensen (1996) recommande une valeur de kEN égale à 0,54.

2. Dosage du carbone microbien :

Le principe de base de la méthodologie appliquée afin de doser le C dans la fraction microbienne du sol a fait l'objet d'une description générale dans le chapitre II : Objectifs et stratégie de recherche, cette partie consiste donc à revoir en détail l'application du protocole élaboré au sein de l'UMR Eco&sol.

L'azote provenant de la décomposition des corps microbiens tués par des vapeurs de trichlorométhane (ou chloroforme) est extrait par une solution de K_2SO_4 . La quantité de carbone organique d'origine microbienne extraite (E_C) est obtenue par la soustraction du carbone organique (C_T) extrait du sol témoin non fumigé (carbone essentiellement non microbien, solubilisé par K_2SO_4) au carbone organique total (C_F) extrait du sol fumigé. La biomasse microbienne est proportionnelle à E_C à un facteur kE_C ; kE_C représente la fraction de carbone microbien extractible après fumigation.

- Fumigation :

Cette étape se déroule obligatoirement sous une sorbonne en bon état de fonctionnement dédiée aux solvants. Les résidus de rinçage sont gardés dans le récipient consacré aux résidus ou déchets chlorés.

- Allumer le groupe de froid.
- Laver à l'eau 3-4 fois 100 ml de trichlorométhane dans l'ampoule à décanter afin de supprimer l'alcool amylique ou amyène qui lui permet de rester stable sous forme liquide.
- Une fois lavé, mettre le trichlorométhane dans un bécher avec quelques petites billes de verre (ou de la pierre ponce) dans le fond du dessiccateur.
- Tapisser le fond du dessiccateur de papier filtre humide ou y mettre une coupelle d'eau pour éviter que les échantillons ne se dessèchent pendant la fumigation.
- Placer les boîtes à tare contenant les échantillons de sol dans le dessiccateur et le fermer.

Marquer les boîtes à tare avec un crayon gras. Ne pas utiliser des marqueurs dont l'encre se dissout sous les vapeurs de trichlorométhane.

- Brancher le groupe de froid entre le dessiccateur et la pompe à vide (le groupe de froid permet de piéger les vapeurs de trichlorométhane) et mettre le dessiccateur sous vide.
- Lorsque le trichlorométhane bouillonne légèrement, le vide est suffisamment établi. Arrêter alors le processus en faisant les actions suivantes dans l'ordre qui suit :

- 1) Fermer le robinet du couvercle du dessiccateur,
- 2) Une minute plus tard, débrancher et boucher le tuyau qui relie le groupe de froid au

dessiccateur,

3) Alors que le groupe froid fonctionne encore, fermer l'arrivée d'eau de la pompe à vide,

4) Désolidariser le dessiccateur du groupe de froid et boucher le conduit relié au groupe de froid,

5) Vider dans le récipient servant à recueillir les résidus ou déchets chlorés le contenu de l'erien du groupe froid (piège) et le laver à l'eau sous la sorbonne en ayant pris le soin de porter le masque de protection respiratoire et les gants.

6) Après avoir rincé abondamment le piège, ce dernier sera remis dans sa niche.

- Recouvrir le dessiccateur d'un sac plastique noir ou de papier aluminium.

- Laisser le dessiccateur sous vide pendant 16 heures à 20-25 c. Le dessiccateur doit être laissé sous la sorbonne.

- Casser le vide en ouvrant délicatement le robinet du dessiccateur et ouvrir le couvercle.

- Laisser les échantillons dans l'atmosphère de la sorbonne pendant 1/2 - 1 h pour éliminer l'excès de trichlorométhane.

- Extraction :

Pour les échantillons fumigés :

- Peser 5 g de sol.

- Les mettre en contact avec 25 ml de K₂SO₄ à 0,05 N dans un tube conique (rapport sol/extractant : 1/5).

- Agiter pendant 45 mn à température ambiante (20-25 c à l'aide d'un agitateur rotatif).

- Centrifuger à 2683 G (ce qui correspond à 4000 RPM pour la centrifugeuse Jouan GR4i) pendant 10 mn.

- Prélever le surnageant, filtrer à 0,2 µm, placer le surnageant dans des tubes en verre et recouvrir d'un parafilm.

Pour les échantillons non fumigés, suivre le même protocole, mais agiter pendant 1 heure.

- Dosage :

Le carbone organique extrait (mg.L⁻¹) est déterminé grâce à un analyseur SHIMADZU type TOC-V.

- Calcul :

Carbone microbien extrait (mg C kg⁻¹) = En = CF⁽¹⁾ – CT⁽²⁾ = (mg C L⁻¹ x FC) - (mg C L⁻¹ x F'C').

⁽¹⁾ CF = C organique extrait du sol fumigé.

⁽²⁾ CT = C organique extrait du sol non fumigé.

F'C' = facteur de correction

Facteur de correction = (volume du K_2SO_4 ajouté (en ml) + volume d'eau d'humectation du sol (en ml) / masse de sol sec (en g).

Biomasse microbienne = E_c/kE_c

Lorsque le carbone extrait est dosé après oxydation à haute température ou oxydation chimique (UV/persulfate), Joergensen (1996) recommande une valeur de kE_c égale à 0,45.

3. Dosage du phosphore dans la plante:

- Minéralisation :

La minéralisation des racines et des feuilles broyées au préalable à $2\mu m$ se fait par four micro-ondes dans des réacteurs fermés de 100 mL.

La méthode consiste à faire passer en solution le végétal introduit dans les réacteurs. Pour ce faire, la solution de minéralisation utilisée est de l'acide nitrique concentré à 65% (Nitric acid puriss 84380 Sigma par exemple). L'attaque se réalise dans des mini réacteurs fermés pouvant supporter des pressions de l'ordre de 110 bars. Après une montée en température à $180^\circ C$ en 5 minutes, cette dernière est maintenue durant 10 minutes. Le cycle de minéralisation dure seulement 15 minutes, mais le temps de refroidissement est d'environ 40 minutes (délai nécessaire avant de pouvoir ouvrir les réacteurs).

- Mode opératoire:

- Peser environ 0,5 g de poudre végétale (noter précisément la pesée).
- Introduire la poudre dans le réacteur de 100 mL en téflon.
- Sous la hotte, introduire 2 mL de H_2O_2 puis 8 mL d' HNO_3 concentré à l'aide des dispensettes préalablement calibrées.
- Insérer les réacteurs dans les enveloppes prévues à cet effet, boucher et serrer avec la clef dynamométrique jusqu'au clic de butée.
- Remplir le carrousel, le munir de sa coiffe et poser l'ensemble sur la porte du four ouverte.
- Sur le terminal, à l'aide du stylet, cocher « Press Prep » puis le bouton répertoire. Choisir la méthode « vegetaux.dig » puis ouvrir.
- Introduire la sonde de température dans le réacteur de référence et insérer le carrousel dans le four (faire tourner le carrousel sur l'axe intérieur pour trouver le cran). Connecter l'extrémité de la sonde à la prise.
- Presser et laisser appuyer sur le bouton en forme de flèche circulaire en haut à gauche du terminal : s'assurer que la sonde n'entrave pas la rotation du rotor.
- Cocher deux fois sur la flèche bleue vers la droite et presser « START »

- Après le cycle de chauffe, attendre 40 minutes que la température des réacteurs retombe en dessous de 45 °c.
- Déconnecter la sonde, retirer la coiffe, sortir les réacteurs un à un et les déverrouiller, à l'aide de la clef dynamométrique en mode dévissage, sous la hotte en état de marche.
- Récupérer le contenu du réacteur dans une fiole de 100 ML.
- Rincer le réacteur avec 10 mL d'eau déminéralisée et récupérer l'eau de rinçage dans la fiole, répéter cette opération deux fois et compléter la fiole à 100 mL avec de l'eau déminéralisée .
- Boucher la fiole avec du parafilm et homogénéiser.

- Dosage:

Réaliser la quantification du phosphore (P) en solution. Le dosage se fait par colorimétrie après avoir formé un complexe phosphomolybdique (1er réactif) associé au vert malachite (2ème réactif). La réaction est alors fixée avec du Polyvinylalcool (PVA) et l'absorbance est mesurée à 630 nm.

- Préparation des réactifs :

1. Mettre environ 500 mL d'eau déminéralisée dans un bécher de 1 L.
2. Sous la sorbonne, ajouter 168 mL d'acide sulfurique et un gros barreau aimanté.
3. Agiter et placer le bécher au congélateur afin de descendre la température à -10°C.
4. Peser 17.55 g d'heptamolybdate d'ammonium et l'ajouter dans un bécher de 250 mL contenant 150 mL d'eau déminéralisée.
5. Ajouter les 150 mL dans la solution d'acide sulfurique et compléter à 1 L dans une fiole : **Réactif 1 (R1)**.

Remarque : Le **réactif 1** doit être filtré avec filtre 0.45µm et conservé au réfrigérateur.

6. Chauffer 100 mL d'eau déminéralisée à 80 °c sur l'agitateur chauffant.
7. Dissoudre 3.5 g de PVA et laisser refroidir à température ambiante.
8. Dissoudre 0.35 g d'oxalate de vert de malachite et ajuster à 1 L dans une fiole : **Réactif 2 (R2)**.

Remarque : Le réactif 2 peut être conservé à température ambiante.

- Dosage du P

- Préparation solution mère

1. Peser précisément 0.439 g de dihydrogénophosphate de potassium, préalablement séché, dans une coupelle en plastique .
2. Introduire la poudre dans un bécher de 50 mL et ajouter 30 mL d'eau déminéralisée.
3. Insérer un petit barreau aimanté et agiter jusqu'à dissolution complète.
4. Verser le contenu du bécher dans une fiole de 100 mL (classe A), et rincer plusieurs fois le bécher

avec de l'eau déminéralisée, récupérer les eaux de rinçage dans la fiole.

5. Compléter la fiole à 100 mL avec de l'eau déminéralisée et agiter : Solution mère à 1 g/L en P.

- Préparation solution fille

Important : la solution fille de P doit impérativement être préparée le jour de l'analyse.

6. Diluer 1000 fois la solution mère avec de l'eau déminéralisée : 50 µL à la micropipette 50-200 µL dans une fiole de 50 mL classe A.

7. Compléter la fiole à 50 mL avec de l'eau déminéralisée et agiter : **Solution fille à 1 mg/L en P**

- Préparation gamme étalonnage

8. A l'aide d'un marqueur, identifier 6 tubes en PP de 10 mL comme suit (ligne dénomination) :

Tableau 5 : Préparation de la gamme étalon.

Dénomination	0	1	2	3	4	5
[P] (µg/L)	0	5	25	100	200	400
[P] (µM)	0	0.16	0.81	3.23	6.46	12.92
V solution fille µL	0	50	250	1000	2000	4000
V Solution fille (mL)	0	0.05	0.25	1	2	4
V matrice ou H2O (protocole extraction)	10	9.95	9.75	9	8	6
Volume total	10 ml					

9. A l'aide des micropipettes, suivre le tableau ci-dessus pour préparer la gamme d'étalonnage dans les tubes 0 à 5.

10. Boucher et homogénéiser les tubes.

- Dosage microplaque

Se munir d'une microplaque (Chaque nouvelle microplaque possède les 6 points de gamme).

A l'aide d'une Pipette Eppendorf mettre 200µl pour chaque point de gamme ainsi que pour chaque échantillon.

A l'aide de la Multi-pette E3 réglée à 40µl et au lancement d'un chronomètre, ajouter 40µl de **Réactif 1 (R1)** dans chaque puits puis placer la micro plaque sur le portoir adapté IKA pour agitation (vitesse d'agitation sur position 1).

Au bout de **10 minutes**, arrêter l'agitation et ajouter à la multi-pette 40µl et au lancement d'un chronomètre, ajouter 40µl de **Réactif 2 R2** dans chaque puits puis placer la micro plaque sur le portoir adapté IKA pour agitation (vitesse d'agitation sur position 1) **pendant 30 mn**.

Lire l'absorbance au lecteur.

4. Dosage du phosphore dans le sol:

La méthode consiste à extraire le phosphore du sol puis à le mesurer par colorimétrie grâce à la méthode au vert de Malachite .

- Préparation des solutions :

-Solution de NaHCO_3 , pH 8,5 (PM $\text{NaHCO}_3=83,99\text{g/mol}$)

Peser 84 g de NaHCO_3 séché une nuit à l'étuve (40°C) et le transférer dans un bêcher de 2.5L. Dissoudre avec environ 1.5L H_2O UltraPure (UP) et ajuster le pH au pH-mètre à $8,5 \pm 0,1$ avec NaOH (dilué) ou HCL (dilué) suivant le pH de départ. Ajuster à 2litres avec H_2O UP.

-Solution d'acétate de sodium 4M (PM $\text{CH}_3\text{COONa}, 3\text{H}_2\text{O}=136.08\text{g/mol}$).

Peser 544,32 g de $\text{CH}_3\text{COONa}, 3\text{H}_2\text{O}$ et le transférer dans le bêcher de 2.5L. Dissoudre avec environ 800ml H_2O UP. A suivre exactement et verser la poudre très lentement en plusieurs fois (il faut 2 à 3 heures pour 544.32 g) Ajuster dans une fiole de 1L avec H_2O UP.

-Réactif 1 pour le dosage au vert de Malachite

Mettre environ 500ml H_2O UP dans un bêcher de 1L . Sous la hotte , ajouter 168ml d'acide sulfurique (éprouvette de 250ml) et un gros barreau aimanté. Agiter et placer le bêcher au congélateur afin de descendre la température à -10°C . Peser 17,55g d'heptamolybdate d'ammonium et l'ajouter dans un bêcher de 250ml contenant 150ml H_2O . Ajouter les 150ml dans la solution d'acide sulfurique et compléter dans une fiole de 1L avec H_2O UP. Ce réactif 1 devra être conservé dans une bouteille de verre brun au frigo entouré de papier aluminium.

-Réactif 2 pour le dosage au vert Malachite

Chauffer 100ml H_2O UP à 80°C sur un agitateur chauffant. Dissoudre 3,5 g de PVA et laisser refroidir à $T^\circ\text{C}$ Ambiante. Dissoudre 0.35g d'oxalate de vert Malachite et ajuster à 1L dans une fiole. Ce réactif2 peut être conserver à $T^\circ\text{C}$ ambiante mais on le met au réfrigérateur comme le R1.

- Extraction :

- Sur une balance de précision (4.10^{-4}g), peser $250 \pm 0.1\text{mg}$ de sol sec tamisé à 2mm dans les tubes à centrifuger en PP de 11,5ml.
- Noter précisément la masse de cette prise d'essai (Pe) pour les calculs et laisser 2 tubes sans sol pour les blancs.
- Introduire 5 ml de NaHCO_3 0,5 M dans chaque tube à centrifuger, homogénéiser.
- Passer les racks de tubes à centrifuger à l'agitateur rotatif pendant 30 mn à vitesse 6.
- Centrifuger les tubes (ouverts car autrement on ne peut pas mettre les tubes) sur la centrifugeuse Sigma® (10000 RPM pdt 5min à 4°C).Le manuel de la centrifugeuse est dans un casier à coté des

congélateurs et regarder la programmation et les freins.

- Une fois centrifugé mettre **3ml** pour PI (Olsen) dans un tube de 11,5ml et **1 ml** pour PT (Olsen) dans un tube de 8ml à minéralisation (bouchon à vis).

Pour Pi :

- Acidification :

Sous la hotte ajouter 100µl HCl concentré 37% dans chaque tube contenant 3ml d'extrait avec une multi-pette et les embouts pour HCl. Laisser dégazer 2 heures tubes ouverts.

- Dosage Pi OLSEN :

- Se munir d'une microplaque. (chaque nouvelle micro plaque possède les six points de gamme).

- A la micropipette mettre **1ml** dans un eppendorf pour chaque point de gamme étalon (tels que décrite pour P végétale) ainsi que pour chaque échantillon +blancs.

-Avec la multi-pette réglée à 200µl(avec le cône R1) et au lancement d'un chronomètre, ajouter 200µl de réactif 1 dans chaque eppendorf , les fermer et les secouer légèrement à l'aide d'un agitateur.

-Au bout de **10 minutes**, ajouter à la multi-pette 200µl (avec le cône R2) de réactif 2. Fermer et secouer légèrement.

-attendre 30 minutes.

-Lire les plaques au lecteur à 630nm.

La gamme nous permet de tracer la droite qui représente la concentration en phosphore en fonction des Absorbances lues. On obtient par linéarité la concentration en phosphore inorganique OLSEN de nos échantillons. On appellera cette concentration : $[P]_{\text{calculée}}$. Si ces valeurs sont en dehors de la gamme utilisée les échantillons devront être dilués avant une nouvelle analyse au lecteur de plaque.

Pour Pt :

- Minéralisation :

-sous la hotte, ajouter 1 ml d'HCl concentré 37% avec une multipette réglée à 1ml et munie de son cône « HCl » pour chaque tube contenant 1 ml d'extrait destiné au dosage de PT.

-Laisser dégazer 2 heures avec les tubes PI sous une hotte. Les fermer hermétiquement (bouchons à vis) et les placer dans des portoirs métalliques et mettre le (ou les) portoir dans une étuve à 105°C pour la nuit.

- Dosage Pt OLSEN :

-Sortir les tubes de l'étuve et laisser refroidir.

-Ajouter 3ml de CH₃COONa 4M (préparer a veille) dans chaque tube.

- Se munir d'une microplaque. (chaque nouvelle micro plaque possède les six points de gamme).
- A la micropipette mettre **1ml** dans un eppendorf pour chaque point de gamme étalon (tels que décrite pour P végétale) ainsi que pour chaque échantillon + les blancs.
- Avec la multi-pette réglée à 200µl (avec le cône R1) et au lancement d'un chronomètre, ajouter 200µl de réactif 1 dans chaque eppendorf, les fermer et les secouer légèrement à l'aide d'un agitateur.
- Au bout de **10 mn**, ajouter à la multi-pette 200µl (avec le cône R2) de réactif 2. Fermer et secouer légèrement.
- Attendre 30 mn .
- Lire les plaques au lecteur à 630nm.

- Calculs :

Pour remonter à la concentration en Phosphore Olsen présent dans le sol étudié, il faut tenir compte des dilutions auxquelles est soumis l'échantillon durant les différentes étapes du dosage. Que se soit pour le PI Olsen ou pour le PT Olsen, le calcul se fait à partir du [P] calculée de la façon suivante :

$$[P \text{ Olsen}] = \frac{[P \text{ Olsen}]_{\text{calculée}}(\mu\text{g/L}) \times V \text{ extractant (mL)} \times \text{Facteur de dilution}}{P_e \text{ (mg)}}$$

The effect of intercropping on the efficiency of faba bean – rhizobial symbiosis and durum wheat soil-nitrogen acquisition in a Mediterranean agroecosystem

GHILES KACI^{1,*}, DIDIER BLAVET², SAMIA BENLAHRECH¹, ERNEST KOUAKOUA², PETRA COUDERC³, PHILIPPE DELEPORTE⁴, DOMINIQUE DESCLAUX⁵, MOURAD LATATI¹, MARC PANSU², JEAN-JACQUES DREVON⁶, SIDI MOHAMED OUNANE¹

¹High National School of Agronomy, Plant Production Department, Laboratory for Integrative Improvement of Plant Productions, El Harrach, Algiers, Algeria

²Research Institute for Development-IRD, UMR Eco&Sols, Functional Ecology and Biogeochemistry of Soils and Agro-Ecosystems, INRA-IRD-CIRAD-SupAgro, University of Montpellier, Montpellier, France

³Interdisciplinary Research Center in Letters, Languages, Arts and Humanities Sciences, UFR Lettres and Humanities Sciences, Antilles

⁴Center for International Cooperation in Agronomic Research for Development-CIRAD, UMR Eco&Sols, Functional Ecology and Biogeochemistry of Soils and Agro-Ecosystems, INRA-IRD-CIRAD-SupAgro, University of Montpellier, Montpellier, France

⁵National Institute of Agronomic Research-INRA, UE Diascope, Montpellier, France

⁶National Institute of Agronomic Research-INRA, UMR Eco&Sols, Functional Ecology and Biogeochemistry of Soils and Agro-Ecosystems, INRA-IRD-CIRAD-SupAgro, University of Montpellier, Montpellier, France

*Corresponding author: kaci.ghiles@gmail.com

ABSTRACT

Kaci G., Blavet D., Benlahrech S., Kouakoua E., Couderc P., Deleporte P., Desclaux D., Latati M., Pansu M., Drevon J.-J., Ounane S.M. (2018): The effect of intercropping on the efficiency of faba bean – rhizobial symbiosis and durum wheat soil-nitrogen acquisition in a Mediterranean agroecosystem. *Plant Soil Environ.*, 64.

The aim of this study was to compare the rhizobial symbiosis and carbon (C) and nitrogen (N) accumulations in soil and plants in intercropping *versus* sole cropping in biennial rotation of a cereal – durum wheat (*Triticum durum* Desf.), and a N₂-fixing legume – faba bean (*Vicia faba* L.) over a three-year period at the INRA (National Institute of Agronomic Research) experimental station in the Mauguio district, south-east of Montpellier, France. Plant growth, nodulation and efficiency in the use of rhizobial symbiosis (EURS) for the legume, nitrogen nutrition index (NNI) for the cereal, and N and C accumulation in the soil were evaluated. Shoot dry weight (SDW) and NNI were significantly higher for intercropped than for the sole cropped wheat whereas there was no significant difference on SDW between the intercropped and sole cropped faba beans. EURS was higher in intercropped than in sole cropped faba bean. Furthermore, by comparison with a weeded fallow, there was a significant increase in soil C and N content over the three-year period of intercropping and sole cropping within the biennial rotation. It is concluded that intercropping increases the N nutrition of wheat by increasing the availability of soil-N for wheat. This increase may be due to a lower interspecific competition between legume and wheat than intra-specific competition between wheat plants, thanks to the compensation that the legume can achieve by fixing the atmospheric nitrogen.

Keywords: carbon storage; grain yield and quality production; legumes; macronutrients; N₂ fixation; plant-soil system

The world's population increases rapidly and global food production must be adapted to the requirements of human consumption. To increase the cultivated acreage would be very difficult, so it is necessary to promote crop production or the efficient use of existing croplands (Ohyama 2017). In response to this challenge, many farmers turn to a new agriculture called modern agriculture, which produces high yields through the generous use of chemical inputs and non-renewable energy, although these chemical inputs limit the cropping systems sustainability. This modern agriculture is being called into question (Ohyama 2017).

Nutritional benefits and agro-ecological services of legumes may constitute an alternative agronomic practice for a better use of the growth resources, by integrating them into cropping systems either in intercropping or in rotating crops (Scalise et al. 2015). On the one hand, rotation including legumes has replaced fallow since the 18th century in Europe, particularly in the Mediterranean basin (Grigg 1974). Rotation would maintain soil fertility when the cycle includes a legume as food-crop or forage-crop, since it provides nitrogen supporting the accumulation of soil organic matter (Liebman and Dyck 1993). On the other hand, intercropping is defined as a system with two or more crops with complementary growth cycles grown simultaneously in the same field (Vandermeer 1989). This system may increase yields and improve the efficiency of the use of soil resources compared to monocropping through complementarity, facilitation and competition between intercropped legumes and cereals (Hauggaard-Nielsen et al. 2008).

Intercropping may also increase N inputs to the plant-soil system, and the growth and yield of the intercropped cereal, by improving the efficiency of rhizobial symbiosis (EURS) (Betencourt et al. (2012) for wheat-chickpea intercrops and Latati et al. (2016) for maize-common bean intercrops). Under field conditions, Li et al. (2001) reported a significant increase in the yield of wheat when it was grown in intercropping with soybean compared to their respective sole cropping. In a long-term experiment, Cong et al. (2015) showed that both intercropping and rotating wheat and faba bean increased N uptake and below-ground productivity. These authors suggested the importance of interspecific facilitation, with symbiotic N₂ fixation by intercropped faba bean improving N availability in the rhizosphere. However, the impact of the

cropping systems on nitrogen-fixing nodules of the rhizobial symbiosis remains poorly understood.

Moreover, the comparative effects on carbon storage of cereal-legumes intercropping and rotations are still poorly known, while it is increasingly established that in intensive agricultural systems, the organic carbon pools in the soil have a negative balance because losses due to root and microbial soil respiration are substantially higher than the gains associated with the decomposition of roots and aerial parts of the plant (Jarecki and Lal 2003). Whereas intensive monocropping systems appear to contribute significantly to the anthropogenic increase of atmospheric CO₂ concentrations (IPCC 2007), species diversity may have a beneficial effect through both functional complementarity and facilitation between plants, by improving productivity while increasing C and N stocks in soil and crop residues (Callaway 2007). Introducing crop management practices such as intercropping of cereals and legumes in agroecosystems can improve soil C stocks (Cong et al. 2015), notably in the rhizosphere of intercropped legumes with low soil organic matter inputs (Tang et al. 2014).

Considering the impact of intensive agriculture on the environment and human health, as well as the many alternatives proposed, such as intercropping legume-cereal, it seems very interesting to know the impact of the intercropping cereal-legume on the symbiotic root nodulation, and to what extent this system would affect the activity of the rhizobial symbiosis in comparison with a legume sole crop.

MATERIAL AND METHODS

Experimental site. Field experiments were carried out over three cropping seasons: 2013, 2014 and 2015. They were located in the INRA (National Institute of Agronomic Research) experimental station in the Mauguio district south-east of Montpellier, France. The centre of the experimental surface was located at 43°37'26.88"N, 3°59'0.34"E.

The region has irregular rainfall, with an annual mean of 609 mm during the period from 2013 to 2015. July was the driest month (mean rainfall of about 14 mm), while the highest rainfall was in autumn (mean of 118 mm in September). The mean annual temperature was about 15°C. The warmest month was July (mean of 25°C), while the coldest month was February (mean of 7°C).

The soil was approximately 31.4% loam, 21.9% clay, 25.2% fine silt and 21.5% coarse silt. The experimental site was alkaline (pH 8.2), with 17 g/kg CaCO_3 , and the cation exchange capacity was about 21.8 cmol_+/kg . The plots used for the experiment were fallow until 2011 and began to be grown in 2012 using the same cropping systems as in this article.

Cropping systems and plant growth conditions.

The field experiment was carried out with one durum wheat cultivar (*Triticum durum* Desf. cv. LA1823) and one faba bean cultivar (*Vicia faba* L. cv. Diva). They were grown as intercrops and as sole crops within biennial rotation between each year. Before crop planting, the first 20 cm of soil were mechanically ploughed using a rotary spading machine, then a passage with a rotary harrow was carried out to prepare seed bed, finally, the seeding was performed at 4 cm depth using an experimental seeder followed by a smooth roller pass to promote the contact between soil and seeds. No chemical or fertilizer treatment was applied to the crops. The experimental design was a split-plot with four blocks. Each block included four sub-plots of 6.2 m × 21 m with a total area of the experimental design of 2083.2 m² (4 × 6.2 m × 4 × 21 m). Each sub-plot was the subject of one of the following four cropping systems (1) wheat-faba bean intercropping system; (2) wheat sole cropping system; (3) faba bean sole cropping system; (4) unseeded and weeded fallow surface. For each sub-plot, mechanical weeding and manual complement was made. After each year, rotation was made between sub-plots of wheat and faba bean sole crops. According to the current farming practice, the seeding density was 350 plants per m² for durum wheat as a sole crop, 60 plants per m² for faba bean as a sole crop and 175 plants for durum wheat and 30 per m² for faba bean as intercrops.

Plants and soil sampling and measurements.

The soil and plants were sampled at the full flowering stage of the faba beans in 2013–2015 growing seasons. For each sub-plot with a given cropping-system, four sampling points were chosen. On each sampling point, a sample of 3 to 5 plants was collected with soil near the roots. The soil near the roots was carefully removed at 30 cm depth to preserve the roots and soil samples were combined into one sample for each sub-plot. Thereafter, this soil was sieved to less than 4 mm to remove the coarse fraction, and then dried in ambient air at least for 48 h.

Finally, the soil obtained after sieving to 4 mm was finely ground using a mechanical grinder and then sieved to 200 μm (Pansu et al. 2001).

In the laboratory, the wheat and faba bean shoots were separated from the roots at the cotyledonary nodes. For each faba bean plant, the nodules were separated from the roots, dried and weighed. The shoots were dried for 48 h at 65°C, and then weighed.

The total yield of both crops was determined following a mechanical harvest using a combine harvester; for each cropping system and sub-plot the crop was collected separately and weighed in the laboratory. In addition, after each harvest the crop residues of each sub-plot were crushed mechanically using the stubble cutter and then incorporated in the soil.

Total N and total C in both plants (shoots, roots, nodules and grain) and soil were determined using an elementary dry combustion analyser (NA2000, Fisons Instruments, Ipswich, UK).

Efficiency in the use of rhizobial symbiosis.

For legumes, the relationship between changes in the biomass of nitrogen-fixing symbiotic nodules and changes in the plant biomass may be an estimator of the efficiency in utilization of the rhizobial symbiosis (Drevon et al. 2011). This simple relationship can also be considered as an indicator of the ability of symbiotic nodules to fix atmospheric nitrogen. In addition, in practice, shoot biomass is often used instead of the total plant biomass to avoid possible underestimation of root biomass during field sampling.

Nitrogen nutrition index. Lemaire et al. (2008) defined the nitrogen nutrition index (NNI) as an indicator for crop nitrogen nutrition. It is defined as the ratio between the actual crop N uptake (N_a) and the critical N uptake (N_c) corresponding to the minimal N uptake without deficiency to allow the maximal growth rate at any time of plant growth, so:

$$\text{NNI} = \%N_a / \%N_c \quad (1)$$

$\%N_c$ is determined with empirical dilution curve such as:

$$\%N_c = ac \times W^{-b} \quad (2)$$

Where: W – actual crop mass (t/ha); ac – critical plant N concentration for 1 t W/ha, and b – constant (Lemaire et al. 2008). For wheat, the values of ac and b are 5.3% and 0.44 (Lemaire et al. 2008).

Statistical analysis and calculations. One- and two-way analyses of variance (ANOVA) were per-

Table 1. *P*-values of two-way ANOVAs with factors year and cropping system on plants and soil variables of this study

	Shoot dry weight (g/m ²)		Nodule dry weight (g/m ²)	Nodules number (nod/pl)	Nitrogen nutrition index		Soil C	Soil N
	wheat	faba bean	faba bean		wheat	faba bean	(%)	(%)
Growing season (= year)	0.23 ^{ns}	1.7 × 10 ^{-5***}	< 2 × 10 ^{-16***}	0.5 ^{ns}	3.3 × 10 ^{-07***}	58 × 10 ^{-5***}	4 × 10 ^{-4***}	2.6 × 10 ^{-7***}
Cropping system	12 × 10 ^{-5***}	0.94 ^{ns}	< 2 × 10 ^{-16***}	0.4 ^{ns}	1.6 × 10 ^{-09***}	0.88 ^{ns}	0.05*	7.5 × 10 ^{-4***}
Interaction between growing-season and cropping system	0.51 ^{ns}	0.15 ^{ns}	0.57 ^{ns}	0.8 ^{ns}	66 × 10 ^{-5***}	0.21 ^{ns}	0.48 ^{ns}	3.7 × 10 ^{-4***}

P* < 0.05; *P* < 0.01; ****P* < 0.001; ^{ns}not significant (*P* > 0.05)

formed using the R software (R Core team 2016). The means were subsequently prioritized using the Tukey's multiple comparison tests at *P* = 0.05. For the cropping systems with faba bean and for each year, a relationship between shoot (SDW) and nodule (NDW) dry weights was determined by a linear regression.

In order to compare the biomass stocks per equivalent area units (g/m²), SDW and, for faba bean, NDW per plant (g/plant) were converted into stocks as follows:

$$\text{SDW (or NDW) stocks} = \text{SDW (or NDW)} \times \text{SD}_{\text{corr}} \quad (3)$$

Where: SD_{corr} – sowing density (SD) of a given species corrected by the area actually occupied by this species. Thus, $\text{SD}_{\text{corr}} = \text{SD}$ for sole crops, and $\text{SD}_{\text{corr}} = \text{SD}/0.5 = \text{SD} \times 2$ in intercropping since the area was halved in intercropping for each species.

Furthermore, to compare the grain protein content, grain N content was converted into protein content as follows:

$$\text{Protein (\%)} = \text{N (\%)} \times k \quad (4)$$

Where: *k* – conversion factor, with wheat *k* = 5.7 and faba bean *k* = 6.25 (Rharrabti et al. 2001, Mohamed Osman Ali et al. 2014).

RESULTS AND DISCUSSION

Nodulation. As shown in Table 1, nodule dry weight of faba bean was very significantly affected by years and cropping system in both cases as compared to nodule number per plant (NN). Figure 1 shows that the NDW per equivalent unit area (NDW g/m²) was significantly higher in sole cropping than in intercropping (+ 54%) in 2013, but

not in 2014 and 2015. In contrast, no significant effect of the cropping system or years was observed on nodules number per plant.

Figure 2 shows significant and positive correlations between NN and NDW in intercropping and in sole cropping within biennial rotation for faba bean. In 2014, the individual nodule-mass remained between 3 and 4 mg whatever the cropping system. However, it was 3.8 mg in intercropping vs. 5.2 mg in sole cropping in 2015.

Several other field studies have addressed the effect of intercropping in various legume-cereal systems on nodule growth in the Mediterranean

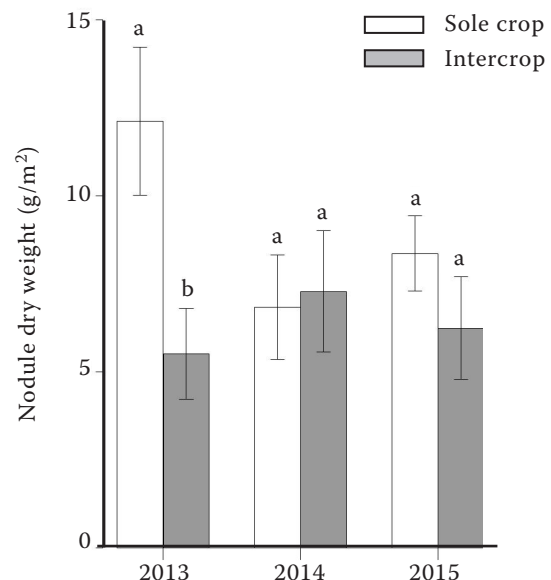


Figure 1. Nodule dry weight of faba bean for each year in sole cropping versus intercropping. Data are means and standard errors of 16 replicates harvested at 130 days after sowing. Within a given year, mean values labelled with different letters are significantly different at *P* < 0.05

doi: 10.17221/9/2018-PSE

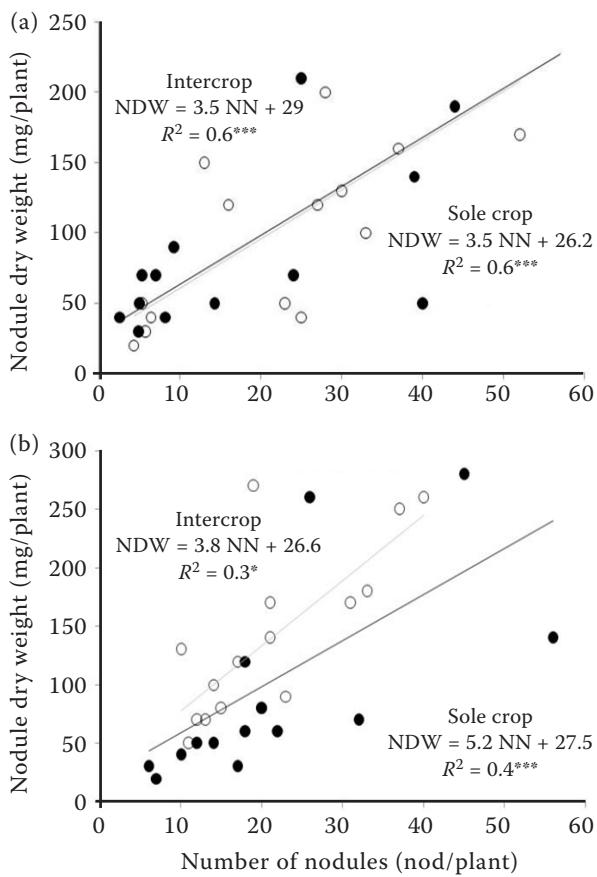


Figure 2. Nodule dry weight as a function of number of nodules for each plant for sole cropped faba beans (white dots) or intercropping (black dots) for (a) 2014 and (b) 2015. The equations on the charts are the regressions for sole crops (light grey text) and intercrops (dark grey text). All regressions were established from sixteen replicates (sixteen plants). * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$

region (Betencourt et al. 2012, Latati et al. 2016a) and in greenhouse experiments (Li et al. 2016).

Efficiency in the use of the rhizobial symbiosis.

Figure 3 shows significant relationships between nodule dry weight and shoot dry weight. The EURS was significantly higher for intercropping than for sole cropping in 2014 (115 vs. 49 g SDW/g NDW) and in 2015 (54 vs. 12 g SDW/g NDW), but not in 2013 (17 vs. 11 g SDW/g NDW). However, Table 1 shows a very significant effect of years on shoot dry weight of faba bean but no significant effect of the cropping system.

This increase in EURS under the intercropping system has also been reported by several other recent studies on Mediterranean agroecosystems (Drevon et al. 2011, Latati et al. 2016). However, for intercropping wheat and faba bean, our results show that NDW

(g/m²) was lower for intercropping in 2013 while for 2014 and 2015, there were no significant differences in the number of nodules and NDW between the two cropping systems. Therefore, as the estimated EURS was higher for intercropping, it would seem that the symbiotic fixation of atmospheric nitrogen does not depend only on nodule biomass. Latati et al. (2014) also reported decoupling between the estimated EURS and the nodular biomass with a

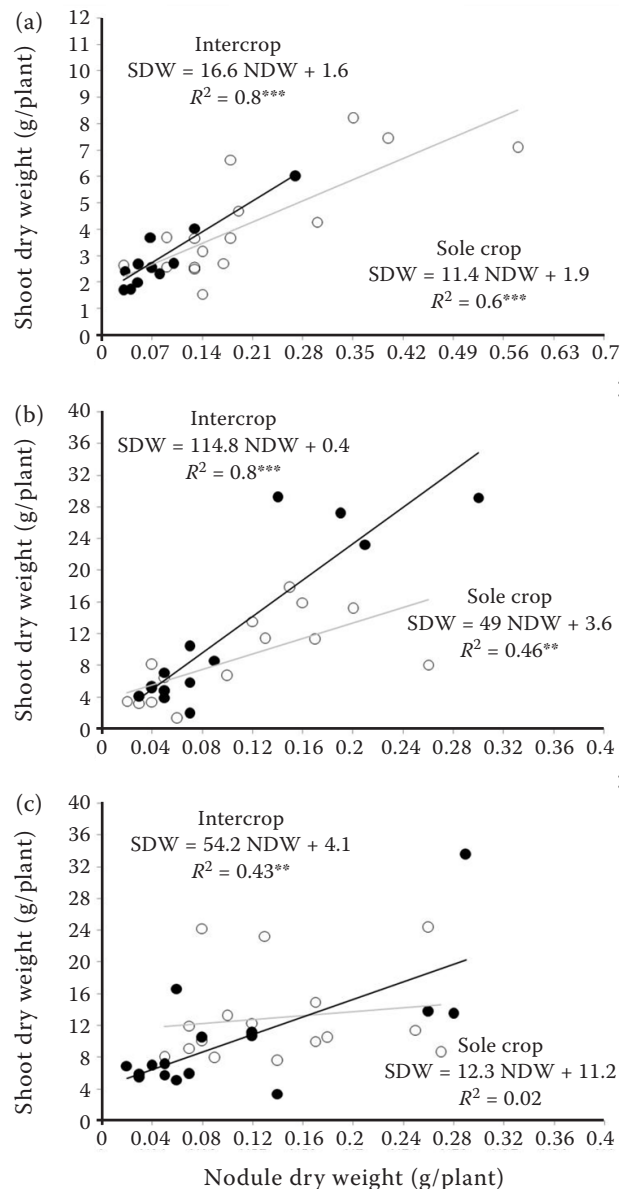


Figure 3. Efficiency in use of the rhizobial symbiosis for faba bean in sole cropping (white dots) versus intercropping (black dots) for (a) 2013; (b) 2014 and (c) 2015. The equations on the charts are the regressions for sole crops (light grey text) and intercrops (dark grey text). All regressions were established from sixteen replicates (sixteen plants). * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$

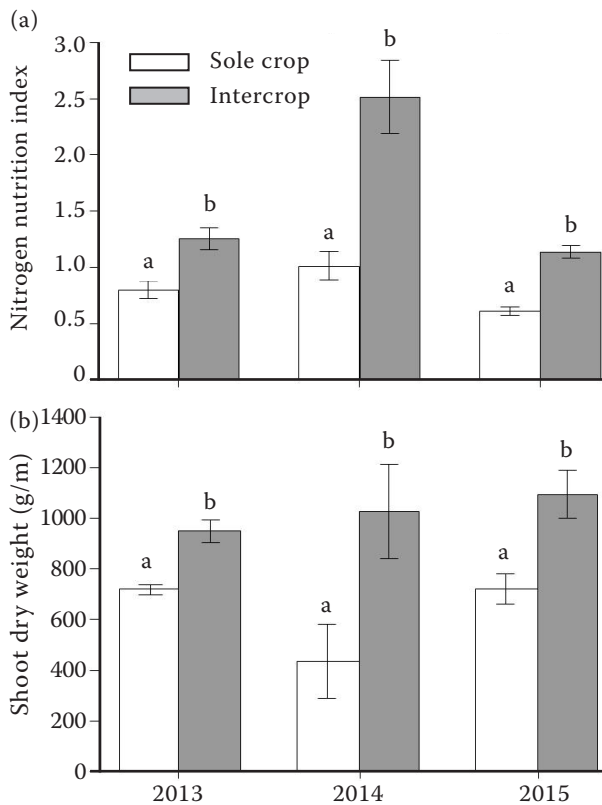


Figure 4. Durum wheat nitrogen nutrition index (a) and shoot dry weight (b) for sole crops and intercrops. Means and standard error for sixteen replicates harvested at 130 days after sowing. For each year, mean values labelled with the same letters are not significantly different at $P < 0.05$

significantly lower nodule biomass but a higher estimated EURS for intercropping.

Cereal nitrogen nutrition index and growth.

Table 1 indicates that with a two-way ANOVA the NNI was very significantly affected by years and by cropping systems. There was also a significant interaction between these two factors, but, as indicated by Figure 4a, this interaction was not a cross interaction, and it was only the fact that wheat NNI was particularly high under intercropping system in 2014 growing season. Furthermore, Figure 4a shows that NNI for intercropping was greater than 1, while it was less than 1 or equal to 1 for sole cropping. NNI for intercropping was 56, 148 and 85% higher than for sole cropping in 2013, 2014 and 2015, respectively.

As shown in Table 1 wheat SDW was very significantly affected by the cropping system but not by the year. The wheat SDW was significantly higher in intercropping than in sole cropping within

biennial rotation: by 32% in 2013, 136% in 2014 and 52% in 2015 (Figure 4b).

The nitrogen nutrition index also indicated that nitrogen nutrition was higher for the intercropped wheat compared to the sole cropped wheat within biennial rotation. This is similar to the results of Latati et al. (2016) who found that the NNI of maize was higher when intercropped with common bean than when monocropped. Furthermore, the shoot dry weight of wheat was significantly higher for intercropping than for sole cropping within biennial rotation over the three-year period of the study. This is in agreement with another study at the same experimental station that showed a higher shoot dry weight of wheat when intercropped with cowpea (Betencourt et al. 2012).

Soil nitrogen and carbon content. Soil organic nitrogen and carbon contents (%) were calculated

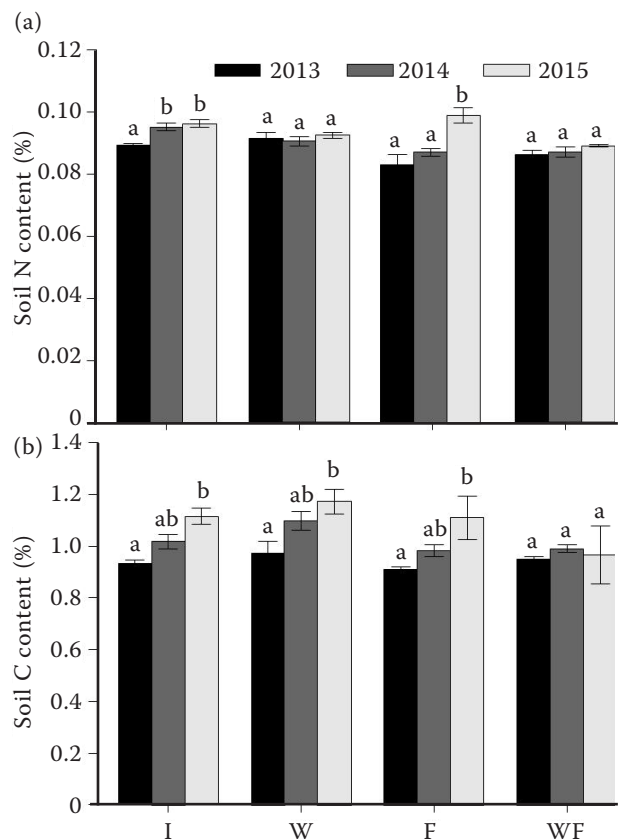


Figure 5. Soil nitrogen (a) and carbon (b) contents in sole cropping versus intercropping versus fallow for 2013, 2014 and 2015. Means and standard error of four replicates for intercropping and unseeded weeded control and eight replicates for rotation. For each cropping system, mean values labelled with the same letters are not significantly different at $P < 0.05$. Where I – intercrops; W – wheat sole crop; F – faba bean sole crop; WF – weeded fallow

doi: 10.17221/9/2018-PSE

Table 2. *P*-values of two-way ANOVAs with factors year and cropping system on grain yield and grain protein content variables of this study

	Grain yield (t/ha)		Grain protein (%)	
	durum wheat	faba bean	durum wheat	faba bean
Growing season (= year)	0.62 ^{ns}	0.61 ^{ns}	3.94×10^{-12} ^{***}	0.2 ^{ns}
Cropping system	7.93×10^{-5} ^{***}	0.86 ^{ns}	4.73×10^{-14} ^{***}	5.26×10^{-6} ^{***}
Interaction between growing-season and cropping system	0.48 ^{ns}	0.41 ^{ns}	3.53×10^{-6} ^{***}	0.4 ^{ns}

P* < 0.05; *P* < 0.01; ****P* < 0.001; ^{ns}not significant (*P* > 0.05)

for the 0–30 cm soil layer for intercropping, for sole crop within biennial rotation, and for unseeded weeded fallow for three years. Table 1 shows a significant effect of years and the cropping system on soil organic nitrogen and carbon content.

As shown in Figure 5a, soil organic N content increased significantly over the three growing seasons when faba bean was present in the cropping system, but no significant increase of N content was observed for wheat sole crop within the biennial rotation and the unseeded-weeded fallow plots. The increase was 8% and 14% for intercropping and faba bean sole crop within biennial rotation, respectively. This is in accordance with the results obtained by Cong et al. (2015), who showed that soil nitrogen storage in a long-term experiment was $11 \pm 1\%$ higher in intercropping faba bean with maize and wheat than in cereal monocropping, or by Hauggaard-Nielsen et al. (2008) who reported that the soil N concentration was higher under pea, faba bean and lupin intercropped with barley, in comparison with barley sole crop. In our study, the soil N content increase in the presence of faba bean may be due to the symbiotic fixation of atmospheric nitrogen by legume which is able to reduce the soil N consumption, and then to increase the soil N availability. On the other hand, for wheat sole crop within biennial rotation, our study suggests that the additional nitrogen brought by legumes the previous year is consumed during the growing season.

Furthermore, Figure 5b shows an increase of soil C content over the three years under intercropping, faba bean and wheat sole crops within biennial rotation (by 19.3% C, 22.2% C and 20.6% C, respectively), but no significant increase was observed under the unseeded-weeded fallow plots. An increase of C content over time in systems including legumes has already been observed in different parts of the world (e.g. Barthes et al. (2006) in tropical zone for

maize and cassava intercropped with beans and peanuts, Dyer et al. (2012) for intercropped maize and soybean; Chapagain and Riseman (2014) for intercropped barley-pea, Scalise et al. (2015) in a south Italian agroecosystem for intercropped barley and faba bean). However, an increase in C content

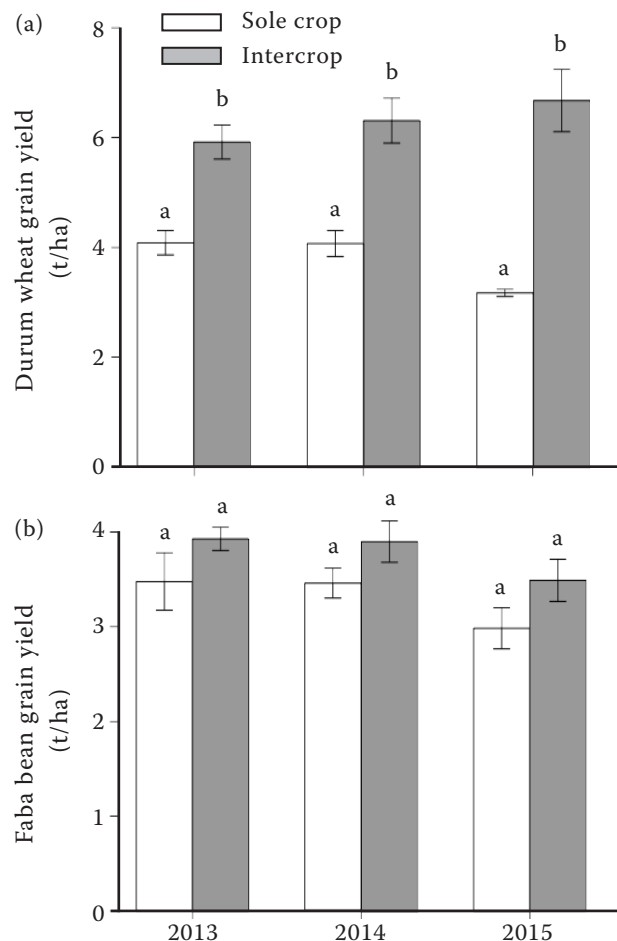


Figure 6. Durum wheat (a) and faba bean (b) grain yield for sole crops and intercrops. Means and standard error for sixteen replicates harvested at total maturity. For each year, mean values labelled with the same letters are not significantly different at *P* < 0.05

under wheat sole crop was also observed in this study. This shows that the incorporation of cereal crop residues into soil quite poor in organic matter can also have a significant effect in terms of soil carbon storage.

Grain yield and grain protein content. Table 2 indicates that the grain yield of durum wheat was significantly affected by the cropping systems and not by the year (Figure 6a); however, faba bean grain yield was not affected by the cropping systems and the year (Figure 6b).

As shown in Figure 6a, the wheat grain yield was significantly higher in intercropping than in sole cropping within the biennial rotation – by 27% in 2013, 58% in 2014 and 50% in 2015.

Furthermore, Table 2 also indicates that the protein content in wheat and faba bean grain was significantly affected by cropping systems. Figure 7a shows

an increase in the protein content in wheat grain intercropped compared to sole crop within biennial rotation by 45% in 2013, 55% in 2014 and 110% in 2015. Similarly, faba bean grain protein content for intercropping was 18, 32 and 26% higher than for sole cropping within biennial rotation in 2013, 2014 and 2015, respectively (Figure 7b).

This increase in wheat productivity in intercropping has also been reported by Huňady and Hochman (2014) who found that grain yield of wheat was higher in intercropping with faba bean than in monocropping. It was also reported in several studies with either maize (Li et al. 2005, Dahmardeh et al. 2010) or durum wheat (Zhang and Li 2003) intercropped with cowpea, faba bean and soybean. Furthermore, the protein content in wheat and faba bean grain was significantly higher for intercropping than for sole cropping in the biennial rotation over the three-year period of the study. This is consistent with another study that found an increase in the protein grain content of wheat and pea concentrations in intercrop compared to the two monocrops (Bedoussac and Justes 2010).

This study provides further evidence that cereal-legume intercropping is a promising alternative to intensive agricultural systems without legumes. Also, the ecological services provided by the legume seem to be able to reduce the need for N inputs, with higher land productivity, acquisition of N and sequestration of C in biomass and soil.

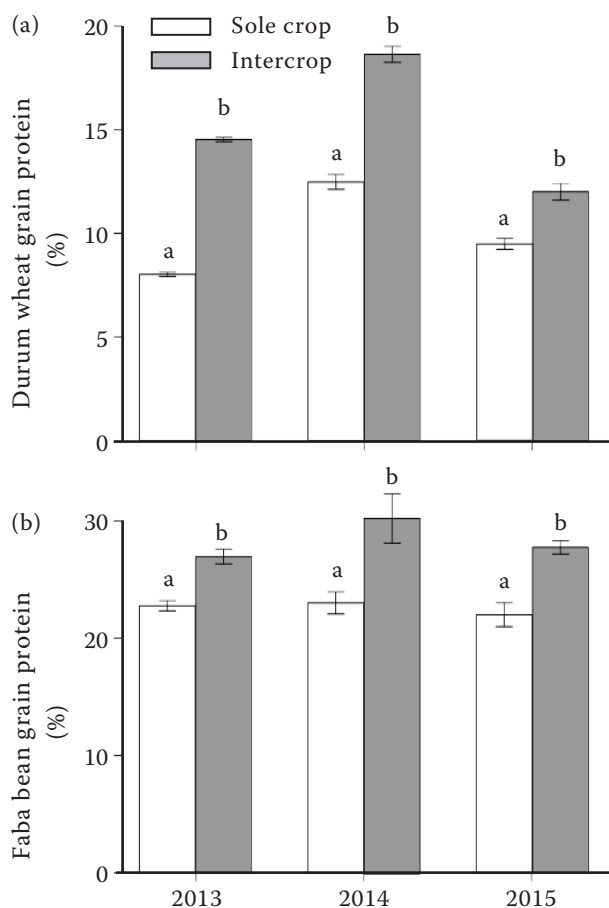


Figure 7. Durum wheat (a) and faba bean (b) grain protein content of sole crops and intercrops. Means and standard error for sixteen replicates harvested at total maturity. For each year, mean values labelled with the same letters are not significantly different at $P < 0.05$

REFERENCES

- Barthes B., Azontonde A., Blanchart E., Girardin C., Villenave C., Oliver R., Feller C. (2006): Effect of a legume cover crop on carbon storage and erosion in an ultisol under maize cultivation in southern Benin. In: Roose E.J., Rattan L., Feller C., Barthes B., Stewart B.A. (eds.): Soil Erosion and Carbon Dynamics. Boca Raton, CRC Press, 143–155.
- Betencourt E., Duputel M., Colomb B., Desclaux D., Hinsinger P. (2012): Intercropping promotes the ability of durum wheat and chickpea to increase rhizosphere phosphorus availability in a low P soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 46: 181–190.
- Bedoussac L., Justes E. (2010): The efficiency of a durum wheat-winter pea intercrop to improve yield and wheat grain protein concentration depends on N availability during early growth. *Plant and Soil*, 330: 19–35.
- Callaway R.M. (2007): Positive Interactions and Interdependence in Plant Communities. Amsterdam, Dordrecht, Springer.

doi: 10.17221/9/2018-PSE

- Chapagain T., Riseman A. (2014): Barley-pea intercropping: Effects on land productivity, carbon and nitrogen transformations. *Field Crops Research*, 166: 18–25.
- Cong W.F., Hoffland E., Li L., Six J., Sun J.H., Bao X.G., Zhang F.S., Van Der Werf W. (2015): Intercropping enhances soil carbon and nitrogen. *Global Change Biology*, 21: 1715–1726.
- Dahmardeh M., Ghanbari A., Syahsar B.A., Ramrodi M. (2010): The role of intercropping maize (*Zea mays* L.) and cowpea (*Vigna unguiculata* L.) on yield and soil chemical properties. *African Journal of Agricultural Research*, 5: 631–636.
- Drevon J.-J., Alkama N., Araujo A., Beebe S., Blair M.W., Hamza H., Jaillard B., Lopez A., Martinez-Romero E., Rodino P., Tajini E., Zaman-Allah M. (2011): Nodular diagnosis for ecological engineering of the symbiotic nitrogen fixation with legumes. *Procedia Environmental Sciences*, 9: 40–46.
- Dyer L., Oelbermann M., Echarte L. (2012): Soil carbon dioxide and nitrous oxide emissions during the growing season from temperate maize-soybean intercrops. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 175: 394–400.
- Grigg D.B. (1974): The early history of agriculture. In: Grigg D.B. (ed): *The Agricultural Systems of the World: An Evolutionary Approach*. New York, Cambridge University Press, 9–23.
- Hauggaard-Nielsen H., Jørgensen B., Kinane J., Jensen E.S. (2008): Grain legume-cereal intercropping: The practical application of diversity, competition and facilitation in arable and organic cropping systems. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 23: 3–12.
- Huňady I., Hochman M. (2014): Potential of legume-cereal intercropping for increasing yields and yield stability for self-sufficiency with animal fodder in organic farming. *Czech Journal of Genetics and Plant Breeding*, 50: 185–194.
- IPCC (2007): *Climate Change 2007: Synthesis Report*. 2007. In: Pachauri R.K., Reisinger A. (eds.): *Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva, Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Jarecki M.K., Lal R. (2003): Crop management for soil carbon sequestration. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 22: 471–502.
- Latati M., Blavet D., Alkama N., Laoufi H., Drevon J.J., Gérard F., Pansu M., Ounane S.M. (2014): The intercropping cowpea-maize improves soil phosphorus availability and maize yields in an alkaline soil. *Plant and Soil*, 385: 181–191.
- Latati M., Bargaz A., Belarbi B., Lazali M., Benlahrech S., Tellah S., Kaci G., Drevon J.J., Ounane S.M. (2016a): The intercropping common bean with maize improves the rhizobial efficiency, resource use and grain yield under low phosphorus availability. *European Journal of Agronomy*, 72: 80–90.
- Lemaire G., Jeuffroy M.-H., Gastal F. (2008): Diagnosis tool for plant and crop N status in vegetative stage. Theory and practices for crop N management. *European Journal of Agronomy*, 28: 614–624.
- Li B., Li Y.Y., Wu H.M., Zhang F.F., Li C.J., Li X.X., Lambers H., Li L. (2016): Root exudates drive interspecific facilitation by enhancing nodulation and N₂ fixation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113: 6496–6501.
- Li L., Sun J.H., Zhang F.S., Li X.L., Yang S.C., Rengel Z. (2001): Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping: I. Yield advantage and interspecific interactions on nutrients. *Field Crops Research*, 71: 123–137.
- Li W.X., Li L., Sun J.H., Guo T.W., Zhang F.S., Bao X.G., Peng A., Tang C. (2005): Effects of intercropping and nitrogen application on nitrate present in the profile of an Orthic Anthrosol in Northwest China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 105: 483–491.
- Liebman M., Dyck E. (1993): Crop rotation and intercropping strategies for weed management. *Ecological Applications*, 3: 92–122.
- Mohamed Osman Ali E.A.A., Awadelkareem A.M., Gasim S., El Amir Yousif N. (2014): Nutritional composition and anti-nutrients of two faba bean (*Vicia faba* L.) lines. *International Journal of Advanced Research*, 12: 538–544.
- Ohyama T. (2017): The role of legume-rhizobium symbiosis in sustainable agriculture. In: Sulieman S., Phan Tran L.S. (eds.): *Legume Nitrogen Fixation in Soils with Low Phosphorus Availability*. Cham, Springer, 1–20.
- Pansu M., Gautheyrou J., Loyer J.Y. (2001): *Soil Analysis: Sampling, Instrumentation and Quality Control*. Lisse, A.A. Balkema.
- R Core Team (2016): *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna, R Foundation for Statistical Computing. Available at: <https://www.R-project.org/>
- Rharrabti Y., Villegas D., Garcia del Moral L.F., Aparicio N., Elhani S., Royo C. (2001): Environmental and genetic determination of protein content and grain yield in durum wheat under Mediterranean conditions. *Plant Breeding*, 120: 381–388.
- Scalise A., Tortorella D., Pristeri A., Petrovičová B., Gelsomino A., Lindström K., Monti M. (2015): Legume-barley intercropping stimulates soil N supply and crop yield in the succeeding durum wheat in a rotation under rained conditions. *Soil Biology and Biochemistry*, 89: 150–161.
- Tang X.Y., Bernard L., Brauman A., Daufresne T., Deleporte P., Desclaux D., Souche G., Placella S.A., Hinsinger P. (2014): Increase in microbial biomass and phosphorus availability in the rhizosphere of intercropped cereal and legumes under field conditions. *Soil Biology and Biochemistry*, 75: 86–93.
- Vandermeer J. (1989): *The Ecology of Intercropping*. New York, Cambridge University Press.
- Zhang F.S., Li L. (2003): Using competitive and facilitative interactions in intercropping systems enhances crop productivity and nutrient-use efficiency. *Plant and Soil*, 248: 305–312.

Received on January 3, 2018

Accepted on March 5, 2018

Published online on March 20, 2018

Abstract

The aim of this study was to compare the rhizobial symbiosis, and C, N and P accumulations in soil, plants and microbial biomass in intercropping *versus* sole cropping in biennial rotation of a cereal, durum wheat (*Triticum durum*), and a N₂-fixing legume, faba-bean (*Vicia faba*) over a three-years period at INRA (Institut National de la Recherche Agronomique) experimental station in Mauguio district south-east of Montpellier, France. Plant growth, nodulation, efficiency in use of the rhizobial symbiosis (EURS) for the legume and phosphorus use efficiency (PUE), nitrogen nutrition index (NNI) for the cereal, and C, N and P accumulation in the soil were evaluated. Shoot dry weight (SDW), NNI and PUE were significantly higher for intercropped- than for sole cropped-wheat whereas there was no significant difference on SDW between intercropped- and sole cropped-faba beans. EURS was higher in intercropped- than in sole cropped faba-bean. Furthermore, by comparison with a weeded fallow, there was a significant increase in soil C, N and P content over the three-years period for intercropping and sole cropping within biennial rotation. It is concluded that intercropping increases the N nutrition of wheat by increasing the availability of soil-N for wheat. This increase may be due to a higher microbial biomass activity and a lower interspecific competition between legume and wheat than intra-specific competition between wheat plants, thanks to the compensation that the legume can achieve by fixing atmospheric nitrogen.

Keywords

Intercropping; Rotation; Legumes; Cereal; N₂ fixation; Pi Olsen; PUE; Carbon storage.

Résumé

Le but de cette étude est de comparer la symbiose rhizobienne et l'accumulations de C, N et P dans le sol, dans la plante et dans la biomasse microbienne en culture associée *versus* rotation bisannuelle d'une céréale, blé dur (*Triticum durum*) et une légumineuse, féverole (*Vicia faba*) sur trois campagnes successives. L'essai a été réalisée à la station expérimentale de l'INRA (Institut National de la Recherche Agronomique) située dans la commune de Mauguio, au sud-est de Montpellier. La croissance des plantes, la nodulation, l'efficacité d'utilisation de la symbiose rhizobienne (EURS) et du phosphore (PUE), l'indice de nutrition azotée (NNI) pour les céréales et l'accumulation de C, N et P dans le sol ont été évalués. Le poids sec des parties aériennes (SDW), le NNI et le PUE sont significativement plus élevés pour le blé cultivé en association par rapport à sa monoculture. L'association permet aussi une amélioration de l'EURS et une augmentation significative des teneurs en C, N et P du sol au cours des trois années.. Cette augmentation serait due à une activité microbienne plus intense et à une concurrence interspécifique plus faible entre les légumineuses et le blé comparée à la compétition intraspécifique entre les plants de blé.

Mots clé

Association ; Rotation; Légumineuses ; Céréales, N₂ fixation; Pi Olsen ; PUE ; Séquestration de Carbone.

المخلص:

كان الهدف من هذه الدراسة هو مقارنة التكافؤ مع الريزوبيل، تراكم C، N و P في التربة والكتلة الحيوية النباتية والكتلة الميكروبية بين النظام الزراعي الممزوج حبوب - باقوليات و النظام الزراعي الأحادي في دوران كل سنة. من الحبوب، القمح الصلب (*Triticum durum*) والبقوليات، الفول (*Vicia faba*) على مدى فترة ثلاث سنوات في المحطة التجريبية للمعهد الوطني للبحوث الزراعية الواقعة في بلدة Mauguio، جنوب شرق مونتيليه. نمو النبات، كفاءة التكافل الريزوبيل (EURS) والفوسفور (PUE)، مؤشر التغذية النيتروجين (NNI) للحبوب وتراكم C، N و P في التربة تم تقييمها. كان الوزن الجاف (SDW)، NNI، و PUE أعلى بكثير بالنسبة الممزوج مقارنة مع الزراعة الأحادية. لاحظت زيادة في EURS تحت تأثير النظام الزراعي الممزوج. بالإضافة إلى ذلك، بالمقارنة مع البور، كانت هناك زيادة ملحوظة في مستويات C، N و P في التربة خلال السنوات الثلاث. نختتم، أن تأثير النظام الزراعي الممزوج يساعد التغذية النيتروجينية للقمح من خلال زيادة توافر N في التربة. قد تكون هذه الزيادة بسبب ارتفاع النشاط الميكروبي وانخفاض المنافسة بين الأنواع بين البقوليات والقمح مقارنة بالمنافسة الفردية بين نباتات القمح. الكلمات المفتاحية: البقوليات، الزراعة المزدوجة، الدوران الزراعي، حجز الكربون، N₂ fixation، Pi Olsen، PUE.