

DEPARTEMENT DE BIOLOGIE VEGETALE ET ECOLOGIE

N°...../SNV/2018

**THÈSE**

Présentée par

**BENIDER chafia**

Pour l'obtention du diplôme de

**DOCTORAT EN SCIENCES**

**Filière: BIOLOGIE**

**Spécialité: BIOLOGIE VÉGÉTALE**

**THÈME**

**Performances de l'association céréales-légumineuses en  
systèmes fourragers des régions semi-arides.**

Soutenue publiquement le 12/05/2018

**DEVANT LE JURY**

Président	BENMAHAMMED Ammar	Pr. UFA Sétif 1
Directeur	MADANI Toufik	Pr. UFA Sétif 1
Examineurs	HAFSI Miloud	Pr. UFA Sétif 1
	ABBES Khaled	DR. INRA (Alger)
	LAIADI Ziane	MCA. UMK Biskra
	BENDDERADJI Laid	MCA. UMB M'sila

*Laboratoire de Valorisation Biologique des Ressources Naturelles*

## Avant propos

Louanges à Dieu le tout puissant et le miséricordieux qui a guidé mes pas vers cette issue. Je remercie mon directeur de thèse le professeur MADANI Toufik qui a accepté avec toute modestie de m'encadrer, malgré ses multiples charges, tout le long de ces années d'études. Je le remercie pour son aide, sa patience, ses conseils précieux qui ont conduit à l'achèvement ce travail. Qu'il trouve ici l'expression mon plus profond respect et ma profonde gratitude,

BENMAHAMMED Amar, qui m'a fait l'honneur de présider mon jury et au professeur HAFSI Miloud de l'université de Sétif, ABBES Khaled directeur de l'INRA d'Alger, LAIADI Ziane de l'université de Biskra et BENDDERADJI Laid d'avoir pris sur son temps pour examiner et juger ce travail.

Mes remerciements vont aussi aux professeurs, ainsi que tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail de recherche, en particulier les professeurs de la faculté des sciences de la nature et la vie, de l'université Ferhat ABBAS, Sétif-1, Mrs BOUZERZOUR Hmanna, MAKHLOUF Abdelhamid, MOUFAK Charafeddin, MOUAFEK Abdenacer, ADJABI Abdelhamid, ROUABEH Amar et en dernier lieu l'ingénieur agronome LAOUAR Salim, Mmes, DERAMCHIA Nawet et GUESSOUM Sabrina de l'INRA de Sétif, GUENDOZ Ali, le Directeur de ITGC, LOUAHDI Nasreddine.

Je tiens aussi à remercier les responsables de la ferme pilote "Salah SERSOUR" où a eu lieu l'expérimentation et à leur tête Mr. BOUGUENDOZ Abdelghani et GOMRI Adel.

BENIDER Chafia.

## ملخص

في المناطق الشبه الجافة بجنوب البحر الابيض المتوسط، التي تتميز بقلة المنتوج النباتي وعدم انتظامه خاصة في المناطق الجافة و المشتهرة بزراعة الحبوب المتأثرة بالتغيرات المناخية اين كمية تساقط اقل من 300مم . الهدف المستوحى من طرف المنتجين هو ايجاد نظام انتاج علفي يتأقلم و تغيرات كمية التساقط مع تحسين وتأمين العلف الموجه للماشية. الدراسة التجريبية تثنم الزراعة العلفية المختلطة مع البقوليات وتقيم مدى تأقلم هذه الاخيرة مع المحيط مقارنة بالانظمة السابقة للتناوب حبوب- عطليل. اجريت دراسة تجريبية بالمزرعة النموذجية سرسور ببلدية بئر حدادة جنوب سطيف، المتعرضة لاجهاد حراري و مائي. لاحظنا تغيرات معنوية على المردود السنوي خلال ثلاث سنوات لخلائط الشعير و التريتيكال و مع البزلاء العلفية التي أثبتت تأقلم تقنية الخليط العلفي تحت تساقط أقل من 200مم/عام. حيث سجل تأثير معنوي للسنة. انتاج الخليط تريتيكال/بزلاء للمادة الجافة 53.07 ق معنويا أكثر من انتاج الخليط شعير/بزلاء 47.07 ق للمادة الجافة. الخليط تريتيكال تبين اكثر تأقلماً وانظمة الانتاج في المناطق الشبه الجافة وتتمين استغلاله في الاراضي المعطلة. الشعير يتلائم زراعة نقيه اكثر منها مختلطة مع البزلاء عكس التريتيكال الذي يتلائم عند خلطه مع البزلاء بفائدة انتاج 11 تعادل 6 ق/ه عن الزراعة النقيه.

دراسة مقارنة ثلاث نسب 25%، 50%، 75% دمج البزلاء في خليط الزرع اظهرت تغيرات معنوية لمعيار النسب على سلوك و انتاج النبات و قد تبين أن الخليط بنسبة 50%-50% يقدم انتاج معنوي عالي 56 ق مادة جافة بفائدة 70 % اكثر من الزراعة النقيه التابعة لها ، تغطية نباتية بين 53%-65% و التي لها علاقة معنوية بالانتاج. اثبتت قدرة الخليط العلفي على مراقبة الاعشاب الضارة مقارنة بالزراعة النقيه. من الناحية المنهجية استعمال طريقة الصور الرقمية مكنت من تقدير نسبة الغطاء النباتي و الشبخوخة باستعمال برنامج خاص (Mesurim Pro (Vertion 3.3 و قد تبينت فاعلية الخليط العلفي في امتصاص الاشعة الضوئية ، أثبتت النتائج تواجد علاقة معنوية موجبة بين الانعكاس الضوئي و الشبخوخة في الاحمر، الأزرق  $r^2=0.78$  ,  $r^2=0.5$  على الترتيب، في حين انها علاقة معنوية سالبة مع نسبة الغطاء النباتي. من ناحية اخرى قمنا بدراسة تخص جمع العقد البكتيرية لدى نبتة البزلاء العلفية ومدى تأثيرها على زراعتها نقيه وكذا على الخليط العلفي مع التريتيكال، الشعير و الخرطال. كثافة العقد تصل الى 21.66 عقدة/النبتة ، عدد العقد يؤثر على تطاول الساق في الخليط تريتيكال 30.83 سم /بزلاء 14.5 سم ، سجلت علاقة معنوية موجبة بين عدد العقد و انتاج المادة الجافة  $r^2=0.86$  تزايد العقد يتأقلم و الخليط العلفي مع تقنية البذر المباشر.

**كلمات مفتاحية:** خايط علفي، جفاف، كتلة حيوية، انعكاس، عقد

## Résumé :

En milieux semi-arides du sud de la méditerranée, caractérisés par une pluviométrie inférieure à 300 mm/an, la production végétale est faible et irrégulière en systèmes de production céréales-élevage des régions soumises aussi aux changements climatiques. L'un des objectifs recherchés par les producteurs est d'adapter les systèmes de production agricole aux contraintes hydriques tout en améliorant les disponibilités fourragères pour l'élevage. Notre expérimentation visait à évaluer les performances des associations de légumineuses et analyser l'adaptation des légumineuses à l'environnement et leur avantage par rapport aux systèmes classiques de rotation céréale-jachère. L'expérimentation a eu lieu à la ferme pilote SERSOUR, située dans la commune de Bir haddada, au Sud de Sétif. Un essai d'observation de la variabilité interannuelle des rendements des performances fourragères de l'orge, du triticale (Céréale fourragère, hybride artificiel entre le blé et le seigle) et de leurs associations avec le pois a été conduit au cours des trois campagnes agricoles 2013/2014, 2015/2016 et 2016/2017. Nos résultats montrent une meilleure adaptation des cultures associées aux conditions pluviales inférieures à 200mm/an. Toutefois, nous avons observé un effet année significatif ; aussi, l'association triticale/pois était significativement plus productive (53.07 qMS/ha), comparée à l'association orge/ pois (47.07 qMS/ha). L'association triticale/pois apparaît mieux adaptée aux systèmes de production et situations climatiques de la région semi-aride dans l'objectif de mieux valoriser les jachères par des cultures intégrant des légumineuses. L'orge performe mieux en culture pure qu'en association avec le pois. Par contre, le triticale valorise mieux les ressources en association avec le pois, il réalise un gain de productivité supérieur à 11%, équivalent à 6q/ha. L'étude comparative des trois proportions (25%, 50% et 75%) du pois dans la densité de semis du mélange, a montré que l'effet des proportions est significatif sur les variables de production à doses égales (T50%/P50) la production était significativement plus élevée (56 q MS/ha), avec un gain de 70% que leur culture pure correspondante ; le taux de recouvrement observé dans les associations varie de 53% à 65%, et est fortement corrélé à la biomasse. Les associations se sont avérées aussi plus efficaces dans le contrôle des adventices par rapport aux cultures pures. Sur le plan méthodologique, nous avons réalisé une étude de l'efficacité de l'utilisation de la photographie numérique analytique, qui a montré que cette approche d'analyse est efficace et estime avec une précision élevée le taux de recouvrement et de sénescence, par l'aide d'un logiciel approprié (le Mesurim Pro, Vertion 3.3). Les résultats montrent l'efficacité des cultures mixtes d'intercepter la lumière ; une corrélation positive significative enregistrée entre sénescence et réflectance dans le rouge et le bleu ( $r^2 = 0.78$ ,  $r^2 = 0.5$

respectivement), par contre la réflectance est significativement négative avec le recouvrement du couvert. Par ailleurs, une étude concernant la collecte des nodosités racinaires prélevées sur le pois fourrager (*Pisum sativum* L.) a été réalisée en cultures pures et en cultures mixtes avec le triticale, l'orge et l'avoine, selon deux types de semis (Semis direct et semis conventionnel). Les résultats montrent des différences significatives de l'association triticale/pois fourrager : L'intensité de la nodulation était de 21.66 nodules/plant, elle a affecté l'élongation des tiges du triticale (30.83 cm) et du pois (14.5 cm). Une corrélation significative positive a été observée entre l'élaboration de la biomasse aérienne et la densité de nodosité ( $r^2 = 0.86$ ). Le nombre de nodules favorise la culture mixte en semi-direct.

**Mots clés:** Association fourragère, sécheresse, biomasse, réflectance, nodosités.

## ABSTRAT

South mediterranean semi-arid cereal-livestock systems are characterized by lower rainfall 300mm which impact cereal production level and interannual regularity. This region is also highly exposed to climate change. One of the objectives sought by producers is to adapt agricultural systems to water constraints while improving forage availability for livestock farming. Our experiment aimed at assessing the performance of legumes intercropping and analyzing the adaptation of legumes to the environment and their benefit through the traditional system of rotation cereals-fallow. The experiment at the pilot farm Sersour, municipality of Bir haddada south of Setif. An interannual variability observation of forage yield performance of barley, triticale and their association with pea was conducted over three marketing years. Shows better adaptation of intercrops to lower rainfall conditions 200 mm/years. We observed the presence of a significant year effect; the intercropping triticale –pea is significantly more productive (53.07 q MS/ha) compared to the intercropping barley-pea (47.07 q MS/ha).the intercropping triticale -pea appears better adapted to the production systems and climatic conditions of the semi-arid region to better value the fallows. The barley performed better in sole crops than has associated with pea. On the other hand triticale values higher in intercropping with pea, showing a productivity gain of 11% equivalent to 6q/ha. The comparative study of the three proportions (25%-50%-75%) of pea in seedling density of the mixture, the effects of the proportion are significant on the production variables at equal dose (T50%:P50%) offers significantly higher output for production (56q MS/ha) with a of 70% that their corresponding sole crops; the recovery rate between (53% and 65%)is strongly correlated with biomass. The intercrops have also proved more effective in controlling weeds by adding to sole crops. Methodologically, we realized a study to evaluate the effectiveness of the use of digital analytical photography; for this analysis approach the recovery rate and senescence are estimated by an appropriate software the Mesurim Pro (Version 3.3). the results shows the effectiveness of mixed cultures to intercept light; a positive and significant correlation between leaf reflectance at red and blue, and senescence ( $r^2 = 0.78$ ,  $r^2 = 0.50$ , respectively).on the other hand it a negative and significant correlation between recovery rate . in addition a study concerns the collection of root nodules are taken from the pea forage (*Pisum sativum* L.) in sole crops and intercrops with triticale, barley and oat, according to two types of seedlings ; direct seeding and tillage. The results showed significant differences between triticale-pea intercropping and nodular intensity in direct seedling (21.66 nodules/plant) affect stalk elongation (30.83-14.5 cm respectively triticale, pea) and improvement of aerial biomass. A significant correlation

( $r^2=0.86$ ) between the density of nodules and the elaboration of the dry matter favorites intercrops and direct seeding.

**Keywords:** Forage intercropping, Drought, Biomass, Reflectance, Nodules.

## Liste des abréviations

<b>D.D.L</b>	Degré De Liberté
<b>CIMMYT</b>	Centro Internacional de Mejoramiento de Maiz y Trigo= Centre International pour l'amélioration du maïs et du blé
<b>DMO</b>	Digestibilité de la matière organique
<b>FAO</b>	Food and Agriculture Organisation of the United nations = Organisation des Nations Unies Pour l'Agriculture et l'Alimentation
<b>FP</b>	Ferme Pilote
<b>GES</b>	Gaz à Effet de Serre
<b>GLAI</b>	Green Leaf Area Index
<b>ITGC</b>	Institut Technique Des Grandes Cultures
<b>IFT</b>	Indice Fréquence de Traitement
<b>LER</b>	Land Equivalent Ratio
<b>MAD</b>	Matière Azotée Digestible
<b>MAP</b>	Mono-Ammonium Phosphate
<b>MAT</b>	Matière Azotée Totale
<b>MV</b>	Matière Verte
<b>MS</b>	Matière Sèche
<b>MO</b>	Matière organique
<b>MADRP</b>	Ministère de l'Agriculture, du Développement Rural et de la Pêche.
<b>NN</b>	Nombre de Nodules
<b>RC</b>	Recouvrement
<b>RGB</b>	Red Green Blue
<b>SAT</b>	Surface Agricole Totale
<b>SAU</b>	Surface Agricole Utile
<b>SC</b>	Semis Conventionnel
<b>SD</b>	Semis-Direct
<b>SAI</b>	Semi-Aride Inferieur
<b>SFP</b>	Surface Fourragère Principale
<b>SFT</b>	Surface Fourragère Totale
<b>SSF</b>	Surface Spécifique Feuille
<b>TMS</b>	Teneur en Matière Sèche
<b>PC</b>	Personal Computer = Ordinateur personel
<b>PDI</b>	Protéines digestibles dans l'intestin
<b>PMG</b>	Poids de Mille Grains
<b>UF</b>	Unité Fourragère

## Liste des figures

Figures	*Pages
Figure. I.1 : Localisation de la région d'étude	32
Figure. I.2 : Diagrammes ombrothermiques de Goussen des régions Centres de Sétif et Bir-Haddada.	34
Figure. I.3 : Production de la matière sèche durant les trois années d'essai des associations : T/P :triticale/pois, O/P :Orge/pois.	37
Figure. I.4: Production de l'association triticale/pois dans la station Sud (Bir Haddada) et la région Centre de Sétif (ITGC) pendant la campagne agricole 2016/2017.	37
Figure. I. 5 : Variation des températures mensuelles durant le cycle végétatif du fourrage au cours de la campagne agricole 2016/2017.	39
Figure .II.1 : Dispositif de prise d'images employé.	43
Figure. II. 2 : Taux de recouvrement du sol par la végétation au stade tallage.	49
Figure. II. 3 : Taux de recouvrement du sol par la végétation au stade épiaison	49
Figure .II.4 : Taux de recouvrement du sol par la végétation au stade maturité	50
Figure.III.1 : Différents taux de recouvrement du sol aux différents stades végétatifs de photographies numériques prises en visée verticale traitées par le logiciel Mesurim des cultures J/S1 : Association Juanillo/Sefrou (75%-25%), J/S2 : Association Juanillo/Sefrou (50%-50%), J/S3 : Association Juanillo/Sefrou (25%-75%), [J : Juanillo pur et S : Sefrou pur].	60
Figure.III. 2 : Rendement fourrager selon les différentes modalités à la récolte.	61
Figure.III. 3 : Biomasse d'adventices mesurée sous des couverts de culture pure et d'association .	63
Figure .IV.1: Description de mesure de la réflectance des feuilles et du couvert au RGB (Red, Green, Blue) par utilisation du logiciel Mesurim Pro.	69
Figure .IV.2 : linière de régression de la réflectance et de la surface spécifique foliaire.	70
Figure .IV.3 : linière de régression de la réflectance et la sénescence foliaire	70
Figure. V.1 : Les nodules, observables sur le système racinaire de pois fourrager.	77
Figure .V.2 : Observation microscopique optique (X1000 Immersion) de la bactérie de genre Rhizobium sur nodule racinaire de pois fourrager.	77
Figure. V. 4 : Corrélation entre la croissance de la biomasse aérienne sèche des traitements étudiés en fonction de la croissance du nombre de nodosités (NN).	82

## Liste des tableaux

<b>Tableaux</b>	<b>*Pages</b>
Tableau.1.1: Les sources fourragères en Algérie.	5
Tableau. I. 1 : Pluviométrie saisonnière (mm) enregistrée durant les campagnes agricoles 2013/014, 2015/16 et 2016/17.	36
Tableau. II.1 : Analyse de la variance du nombre de plants levés/m <sup>2</sup> de l'orge Fouara, du triticales Juanillo, du pois Séfrou et des associations Fouara-Séfrou et Juanillo-Séfrou.	45
Tableau. II.2 : Valeurs moyennes du nombre de plants levés de l'orge Fouara, du triticales Juanillo, du pois Séfrou et des associations Fouara-Séfrou et Juanillo-Séfrou.	46
Tableau. II.3 : Analyse de la variance de la biomasse aérienne accumulée, du ratio de la matière sèche des feuilles/matière sèche des tiges et du taux de recouvrement du sol par la végétation aux stades végétatifs tallage, épiaison et maturité de l'orge Fouara, du triticales Juanillo, du pois Séfrou et des associations Fouara-Séfrou et Juanillo-Séfrou.	46
Tableau. II.4 : Valeurs moyennes de la biomasse aérienne accumulée, du ratio de la matière sèche des feuilles/matière sèche des tiges et du taux de recouvrement du sol par la végétation aux stades végétatifs tallage, épiaison et maturité de l'orge Fouara, du triticales Juanillo, du pois Séfrou et des associations Fouara-Séfrou et Juanillo-Séfrou (effet moyen stade végétatif et interaction).	47
Tableau. III.1 : Analyse de la variance (ANOVA) de la biomasse aérienne accumulée, du ratio de la matière sèche des feuilles/matière sèche des tiges et du taux de recouvrement du sol par la végétation aux stades végétatifs tallage, épiaison et maturité de du triticales Juanillo, du pois Séfrou et des associations Juanillo-Séfrou (effet moyen stade végétatif et interaction).	59
Tableau.III.2 : Analyse de la variance de la biomasse aérienne accumulée, du ratio de la matière sèche des feuilles/matière sèche des tiges et du taux de recouvrement du sol par la végétation aux stades végétatifs tallage, épiaison et maturité du triticales Juanillo, du pois Séfrou et des associations Juanillo-Séfrou.	59
Tableau. III.3 : Rendement en grains par variété selon les différentes modalités et valeurs de LER.	62
Tableau. IV.1 : Analyse de la variance (ANOVA), de la reflectance, la surface spécifique foliaire et la sénescence des variétés cultivées Fouara, Juanillo et Sefrou.	70
Tableau IV.2 : Analyse de la variance (ANOVA) de la reflectance RGB, le recouvrement et l'indice GLAI en associations et cultures pures.	71
Tableau. V.1: Résultat de l'ANOVA (P<0.05) des paramètres de la levée, de la hauteur des tiges et du nombre de nodosités en association Orge/Pois (O/P), Triticale/Pois (T/P) et Avoine/Pois (A/P) en pois pur.	80

## Table des matières

---

Avant propot.....	I
Résumé.....	II
Liste des abréviations.....	VII
Liste des tableaux.....	VIII
Liste des figures.....	IX

---

<b>Introduction.....</b>	<b>01</b>
--------------------------	-----------

---

### Revue bibliographique

<b>1. Généralités sur les Fourrage.....</b>	<b>4</b>
1.1. Importance économique et agronomique des fourrages dans le monde .....	4
1.2. Ressources et productions fourragères en Algérie .....	4
1.2.1. Les parcours.....	5
1.2.2. La jachère pâturée.....	5
1.2.3. Les fourrages artificiels.....	6
1.2.4. Les Luzernes annuelles.....	6
1.2.5. Les associations fourragères.....	6
1.2.6. La paille et les résidus des céréales.....	7
1.3. Les contraintes de développement de la filière.....	7
1.4. La place des fourrages dans les hautes plaines Sétifiennes.....	8
<b>2. Généralité sur les associations fourragères.....</b>	<b>9</b>
2.1. Définition d'une association.....	9
2.2. Fonctionnement de l'association .....	10
2.2.1. Forme d'interaction entre les espèces associées.....	10
2.3. Partage des ressources entre espèces associées.....	13
2.3.1. Partage de la lumière .....	13
2.3.2. Acquisition de l'azote .....	15
2.3.3. Eau.....	16
2.3.4. Phosphore .....	17
2.4. Intérêt de l'association.....	17
2.4.1. Accroître les rendements et améliorer la qualité des grains et des fourrages.....	17
2.4.2. Autonomie alimentaire des élevages et meilleure stabilité face aux aléas.....	18
2.4.3. Contrôle des bioagresseurs.....	19
2.4.4. Valoriser l'azote pour réduire l'utilisation des engrais et leurs impacts.....	20
2.4.5. Améliorer la performance environnementale.....	21
2.5. Les différentes organisations spatiales .....	21
2.5.1. Les associations en mélange.....	21
2.5.2. Les associations en rangs.....	22
2.5.3. Les associations en bandes.....	22
2.5.4. La combinaison du semis en rangs de la culture de vente avec un semis en plein de la plante de service.....	22
2.6. Plasticité phénotypique (choix variétale).....	23
2.7. Paramètres liées aux performances des associations fourragères.....	23

2.7.1. Croissance aérienne : (biomasse totale).....	23
2.7.2. Taux de couverture.....	27
2.7.3. La symbiose Rhizobium-légumineuses.....	27

---

## **Résultats**

### **Chapitre I : Effet des facteurs climatiques sur la productivité des associations céréale/pois en zone semi-aride.**

Résumé .....	29
1. Introduction .....	30
2. Matériels et méthodes.....	31
2.1. Choix du site .....	31
2.2. Climat de la zone d'étude.....	32
2.3. Installation de l'essai.....	34
3. Résultats et discussion .....	35
3.1. Effet année.....	35
3.2. Production de la matière sèche.....	36
4. Conclusion.....	39

---

### **Chapitre II : Performances fourragères de l'orge (*Hordeum Vulgare* L.) du triticale (*X Tritico-secale* Wittmack) et du pois (*Pisum sativum* L.) Et de leurs associations sous conditions semi-aride.**

Résumé.....	40
1. Introduction.....	41
2. Matériels et méthodes.....	42
2.1. Site, climat, matériel végétal et dispositif expérimental .....	42
2.2. Suivi, notations et analyses des données.....	43
2.3. Recouvrement du sol par la végétation.....	43
2.4. Biomasse aérienne, ratio feuilles/tiges et Land equivalent ratio (LER) .....	44
2.5. Analyse des données.....	44
3. Résultats.....	44
3.1. Plantes installées et biomasse aérienne accumulée .....	44
3.2. Recouvrement du sol, ratio feuille/tige et land equivalent ratio (LER).....	48
4. Discussion.....	51
5. Conclusion.....	53

---

### **Chapitre III : Effet de proportion au semis sur la productivité des associations céréales-légumineuses**

Résumé .....	54
Introduction.....	55
1. Matériels et Méthodes.....	56
1.1. Présentation de la région d'étude .....	56
2.2. Matériel et végétal.....	57
1.3. Dispositif Expérimental .....	57
1.4. Mesures effectuées.....	58

2. Résultats.....	59
2.1. Effet stade de développement sur les productions des cultures.....	59
2.2. Effet modalité de culture sur la couverture végétale.....	60
2.3. Effet des modalités de culture sur le rendement fourrage.....	61
2.4. Effet des modalités de culture sur le rendement grains.....	61
2.5. Effet des modalités de culture sur les adventices.....	62
3. Discussion.....	63
4. Conclusion.....	65

---

## **Chapitre IV Estimation de la réflectance (RBG) dans l'association céréale/pois par méthode d'analyse de l'image numérique**

Résumé.....	66
1. Introduction.....	67
2. Matériels et méthodes.....	68
3. Résultats et discussion.....	69
3.1. A l'échelle feuille.....	69
3.2. A l'échelle culture.....	70
4. Conclusions.....	71

---

## **Chapitre V : Efficacité de la symbiose Rhizobium-légumineuse sur fonctionnement des associations céréales/légumineuses.**

Résumé.....	73
Introduction.....	74
2. Matériels et Méthodes.....	75
2.1. Présentation de la région d'étude.....	75
2.2. Matériel végétal.....	75
2.3. Dispositif Expérimental.....	76
2.4. Mesures effectuées.....	76
3. Résultats.....	76
3.2. Importance de la nodulation.....	78
3.3. Paramètres affectant la nodulation.....	78
3.3.1. Effet sur la levée.....	78
3.3.2. Effet de travail du sol.....	79
3.3.3. Effet culture mixte.....	79
3.3.4. Effet sur la croissance aérienne des plantes : (Elongation des tiges et rendement en matière sèche).....	80
4. Conclusion.....	82

---

<b>Conclusion et perspectives.....</b>	<b>84</b>
--	-----------

<b>Références.....</b>	<b>88</b>
------------------------	-----------

<b>Annexe.....</b>	<b>108</b>
--------------------	------------

## Introduction

En Algérie, la céréaliculture occupe une place de choix dans les systèmes de production agricoles, mais sa culture est influencée par les conditions géographiques, climatiques et agronomiques. Parmi les conditions agronomiques, on souligne le travail du sol, les systèmes de culture et les rotations culturales (Boulal *et al.*, 2007). Les hautes plaines sétifiennes sont habituellement présentées comme un territoire dominé par les céréales pluviales, blé et orge, associées à l'élevage. Les systèmes de culture sont basés sur une rotation céréale/jachère, et la jachère occupe une surface excessive, évaluée à 40 % de la surface agricole utile (Abbas et Abdelguerfi, 2005), ce qui pose le problème de sa valorisation par des cultures adaptées et plus performantes. Les techniques conventionnelles de production appliquées aux cultures des céréales dans notre pays engendrent des menaces sur la biodiversité, la fertilité et la qualité des sols à cause de l'érosion (Benniou, 2012). De ce fait, Afin d'optimiser et pérenniser les ressources disponibles (sol, environnement, coûts de production, biodiversité, eau..), nous sommes amenés à changer nos façons de produire et nos pratiques dans le cadre d'une nouvelle approche des techniques culturales. En effet, dans le cadre de l'amélioration des techniques culturales, qui a pour objectif principal l'augmentation des rendements et la durabilité de la production agricole, les techniques culturales simplifiées jouent un rôle important dans l'amélioration des systèmes de cultures tout en préservant les ressources pour les générations futures.

Pour sauvegarder nos ressources du phénomène de dégradation du sol dans les hautes plaines céréalières, le recours aux techniques culturales simplifiées et au semis direct semble constituer une alternative viable (Abellaoui *et al.*, 2010). En effet, la technique de travail du sol classique avec labour a atteint ses limites de développement dans certaines régions.

Au cours de ces dernières décennies, une nouvelle initiative à travers le monde accorde une attention particulière pour renverser le processus actuel de dégradation des sols et à réaliser cet objectif double et antagoniste, d'améliorer progressivement la production et de préserver l'environnement par l'adoption des techniques de l'agriculture de conservation.

L'agriculture de conservation est un ensemble de techniques agronomiques permettant de conserver et d'améliorer le potentiel agronomique des sols. Cette agriculture repose essentiellement sur trois piliers: (i) Les résidus des cultures et notamment la paille, (ii) suppression du travail du sol et (iii) les rotations des cultures (Aboudrare, 2009 ; Mrabet, 2001). La rotation des cultures demeure un élément important de maintien et d'amélioration des propriétés physico-chimiques et de la fertilité du sol, elle permet l'élimination des adventices, considérées comme engrais vert, a un effet positif sur la pollution et la limitation

des maladies, les résidus des cultures apportent de l'azote à la culture suivante, ainsi que la rotation participe la stabilité du rendement et à l'amélioration des systèmes de production (Berner *et al.*, 2013 ; Keith et Balduim, 2006).

Nombreux travaux scientifiques attirent l'attention sur les conséquences du système conventionnel et soulignent l'intérêt économique, agronomique et le respect de l'environnement que produisent le semis direct et les techniques culturales simplifiées. Mais peu d'expériences ont lieu sur l'intérêt de cette technique agricole pratiquée sur différentes successions de cultures et son effet sur les propriétés du sol en région sèches. En effet, en Algérie le semis direct est encore au stade embryonnaire alors qu'au Maroc (Mrabet, 2001) et en Tunisie (Raunet, 2002) la plus grande part des travaux concerne les aspects phytotechniques (rendement, contrôle des résidus, contrôle des mauvaises herbes).

L'objectif de notre thèse est tout d'abord d'étudier la performance des associations céréales-légumineuses vis-à-vis des cultures monospécifiques correspondantes. Cela représente une simple analyse de cette performance, étant donné le nombre de combinaisons possibles entre les différents éléments techniques décrits précédemment et les autres que nous n'avons pas considéré. Une telle analyse aurait nécessairement une portée limitée par manque de généralité. Par conséquent, les travaux de cette thèse ne se limitent pas à analyser la performance des associations, mais cherchent autant que possible à comprendre et à décrire les mécanismes à l'échelle du peuplement au champ. En outre, l'objectif de cette thèse se veut être finalisé en apportant des informations utiles pour la conception d'itinéraires techniques performants et réalisables à l'échelle du système de culture. Cela revient à déterminer quelles sont les espèces à associer, les variétés, les dates et densités de semis, les structures de couvert à privilégier en fonction des objectifs de production. Tout ceci bien sûr en n'oubliant pas de prendre en compte le risque climatique.

A travers cet objectif ambitieux nous avons cherché, autant que possible, de proposer de nouvelles méthodes d'analyse et de pistes de réflexion pour la conception et la description de la réalisation de la performance des cultures en milieu contraint, à travers l'étude des interactions entre espèces et plus largement sur les expérimentations nécessaires et les mesures indispensables à réaliser notamment d'un point de vue dynamique d'associations qui soient adaptées à différents objectifs de production.

Le manuscrit est constitué d'une première partie présente une analyse bibliographique autour des connaissances actuelles sur les fourrages et l'association fourragère. La seconde partie sera consacrée à la présentation des résultats obtenus concernant l'étude du fonctionnement de l'association (céréale/légumineuse) grâce à l'approche expérimentale :

- Effet climat sur le rendement des associations étudiées.
- Performance des associations fourragères sur le plan productivité selon plusieurs stades phénologiques des deux types d'espèces (graminées et légumineuses).
- La mise en évidence de l'effet de proportion au semis sur la productivité des associations.
- Effet de la réflectance (Red Green Blue, RGB) sur la dynamique de croissance des associations fourragères.
- Effet de La symbiose *Rhizobium*-légumineuse sur le fonctionnement et le rendement des associations fourragères.

Enfin, une synthèse générale des résultats obtenus et des perspectives de ce travail de recherche est présentée en dernier lieu.

# **1. Généralités sur les Fourrages**

## **1.1. Importance économique et agronomique des fourrages dans le monde**

Les terres consacrées à l'élevage couvrent près de 3.5 milliards d'hectares dans le monde, soit 70 % des surfaces agricoles et la demande en produits animaux est en hausse constante, notamment dans les pays arides et semi-arides. D'une importance capitale dans le développement durable des régions chaudes, la production fourragère est le principal levier de la productivité des systèmes d'élevage. Elle joue également un rôle essentiel dans les systèmes qui allient productions végétales et animales et dans de nombreux systèmes agro écologiques intègrent des plantes fourragères (Klein et *al.*, 2014). Les fourrages sont produits pour répondre, en quantité et en qualité, aux besoins alimentaires des animaux d'élevage herbivores. Le choix de la production varie selon le type de prairie (permanente ou semée), les espèces et les variétés de fourrages (graminées, légumineuses... ; maïs, sorgho, betterave...), et son utilisation (pâturage, ensilage...) (Huyghe, 2003).

Les prairies, y compris les pâturages ensemencés et les pâturages pastoraux, figurent parmi les plus grands écosystèmes du monde et contribuent aux moyens de subsistance de plus de 800 millions de personnes (FAO, 2000). Ils sont une source de biens et de services tels que la nourriture des animaux d'élevage, l'habitat des fourrages, fournissent de l'énergie à la faune, et constituent également des puits de stockage du carbone et une protection des bassins hydrographiques pour plusieurs grands systèmes fluviaux. Les prairies sont importantes pour la conservation in situ des ressources génétiques. Sur un total de 10 000 espèces, seulement 100 à 150 espèces fourragères ont été cultivées (FAO, 2000). Les estimations de la proportion de la superficie terrestre couverte par les prairies varient entre 20 et 40%, selon la définition. En utilisant les données et la définition de la FAO, il est possible d'estimer la superficie mondiale des pâturages et cultures fourragères à 3,5 Milliards d'hectares en 2000, représentant 26% de la superficie terrestre mondiale et 70% de la superficie agricole.

## **1.2. Ressources et productions fourragères en Algérie**

Le potentiel fourrager existant en Algérie est structuré autour de quatre ensembles, d'inégale importance, constitués par les prairies naturelles, les parcours steppiques, les fourrages cultivés et les parcours forestiers. Un examen de la structure selon les diverses zones agro écologiques, a permis d'estimer les superficies occupées par les fourrages ou utilisées pour l'alimentation du cheptel à environ 39 millions d'hectares (Adem et Ferrah, 2002). Les principales ressources fourragères se composent des chaumes de céréales, de la végétation des jachères pâturées et des parcours qui représentent 97.7% de la surface

fourragère totale, et de peu de fourrages cultivés (1.95%) et des fourrages naturels (0.51%) (Khaldoun *et al.*, 2000). En terme d'offre, exprimée en unités fourragères (UF), l'Algérie disposait en 2001 de 8 milliards d'UF issues principalement des zones céréalières (52%) et des parcours steppiques (44%). Ces données témoignent, encore une fois, du caractère extensif de la production fourragère en Algérie (Adem et Ferrah, 2002).

Les fourrages regroupent toutes les plantes consommées par le cheptel, par pâturage, sous forme de foin, d'ensilage ou des agglomérés (Tableau.1). La plupart des espèces de plantes fourragères font partie de la famille des graminées et des légumineuses. L'Algérie par sa nature, son climat, son relief, ses formations végétales et ses habitudes et pratiques d'élevage de sa population humaine, est un pays à vocation pastorale et fourragère par excellence, mais son cheptel est encore sous alimenté (Senoussi, 2010).

**Tableau .1:** les sources fourragères en Algérie.

Sources fourragères	Superficie (hectares)	Productivité moyenne UF/ha	Observations
Parcours steppiques	15 à 20 millions	100	Plus au moins dégradés
Les forêts	+ 03 millions	150	/
Chaumes de céréales	+ 03 millions	300	Nécessité d'améliorer la qualité des chaumes
Végétation de jachères pâturées	- 02 millions	/	Nécessiter d'orienter la végétation
Fourrages cultivés	- 500 000	1000/2000	Orge, avoine, luzerne, trèfle, Vesce/avoine, sorgho
Les prairies permanentes	- 300 000	/	Nécessité d'une prise en charge

(Senoussi, 2010)

### 1.2.1. Les parcours

Constitués surtout par la steppe, ils s'étalent sur plus de 12 millions d'hectares, ils produisent en moyenne 110 UF/ha soit plus de 1.3 milliards d'UF, utilisés en commun par un nombre important de troupeaux. En effet 70% du cheptel national (ovin et caprin) y est concentré (Khaldoun *et al.*, 2000).

### 1.2.2. La jachère pâturée

La jachère constitue une partie intégrante des systèmes de production céréales-ovins de la zone semi-aride, caractérisée par des sols fragiles et une pluviométrie limitante. La part de la jachère travaillée diminue alors que celle de la jachère pâturée augmente et représenterait 9% de l'offre fourragère totale. La jachère, parfois utilisée comme surface pastorale, est un facteur d'équilibre pour ces exploitations généralement de petites

dimensions (Abbas et Abdelguerfi, 2005). Depuis plus de 30 ans, la part de la jachère n'a pas beaucoup changé et reste très importante. La jachère continue en effet d'occuper environ 40% de la SAU de la zone céréalière en Algérie (Bedrani *et al.*, 2001). Par ailleurs, la prise en compte de l'ensemble des terres, y compris les parcours pastoraux, montre que la part de la jachère dans la surface agricole totale (SAT) a tendance à augmenter, particulièrement dans les zones semi-arides. (Abbas et Abdelguerfi, 2005).

### **1.2.3. Les fourrages artificiels**

Les fourrages cultivés sont composés essentiellement de l'avoine, l'orge et l'association vesce avoine ; de la superficie réservée aux fourrages artificiels. 10% est affectée aux céréales (orge, avoine et seigle). La luzerne et le sorgho sont peu représentatifs avec 01 à 05 % de la superficie cultivée (Abdelguerfi, 2002).

### **1.2.4. Les Luzernes annuelles**

Le remplacement de la jachère pâturée par une légumineuse annuelle offre des avantages certains, particulièrement sur le plan de la qualité du fourrage obtenu, de la fertilité du sol et de la maîtrise de la flore adventice. Cependant, les efforts mis en œuvre pour vulgariser l'adoption et l'extension des luzernes annuelles (*Medicago ssp* L.) n'ont pas été couronnés du succès attendu (Zeghida, 1987). Ceci est surtout dû à la sensibilité des écotypes importés, à l'altitude et aux contraintes abiotiques qui caractérisent les zones où la suppression de la jachère est la plus souhaitée et là où l'élevage est le plus pratiqué (Chatterton et Chatterton., 1996).

### **1.2.5. Les associations fourragères**

Le semis des céréales associées à une légumineuse fourragère à grosse graine est une solution pour réaliser un stock fourrager important au printemps. Les céréales comme l'orge, l'avoine et le triticale sont plus fréquemment utilisés, associées parfois à une vesce commune. L'utilisation de l'orge en association avec la vesce permet d'améliorer la quantité et la qualité du fourrage. L'association vesce-avoine a été rapidement adoptée et occupe parfois des superficies au détriment de la jachère pâturée. Malheureusement, peu d'intérêt est accordé à sa conduite ce qui a pour conséquence la production d'un foin de qualité médiocre : 0,4 UF/kg de matière sèche (Ouknider et Jacquard, 1986). Cette association représente plus de 7.2% des fourrages artificiels cultivés. Elle a toutefois connue depuis la dernière restructuration du secteur agricole (1987) une nette régression de ses superficies. Elles passent ainsi de 364.000 ha en 1986 à 50.040 en 2013 ; la production a aussi connu le même phénomène de régression, elle passe de (7.500.000 à 3.230.644 q) respectivement pour les années 1986 et 2013

(MADRP, 2013). En effet, le prix du quintal de foin de vesce-avoine était parfois supérieur au prix d'un quintal de grains de blé (Hamadache, 2001).

### **1.2.6. La paille et les résidus des céréales**

La faiblesse de la production du fourrage vert et sec explique le recours à la paille et à la vaine pâture des résidus de céréales. La paille des céréales est ramassée après la moisson, elle est mise en bottes et conservée pour être distribuée au cours de l'automne et en hiver, lorsque le froid ne permet pas une croissance suffisante de l'herbe en plein champ (Mossab, 2007). Elle est aussi utilisée comme litière quand sa production est abondante.

## **1.3. Les contraintes de développement des fourrages.**

Malgré les efforts consentis à son amélioration, la production de fourrages reste faible et ne peut satisfaire les besoins sans cesse croissants du cheptel. Les surfaces fluctuent d'une année à une autre, elles sont passées de 918.000 ha en 1988 à 430.450 ha en 1998 pour augmenter ensuite à 693.989 ha en 2013 (MADRP, 2013).

Actuellement, les fourrages occupent une surface de 693.989 ha, ce qui représente un taux de 8.2% de la SAU, alors qu'une superficie importante est laissée annuellement en jachère (MADRP, 2013), et cette faiblesse est liée à :

- a.** L'inadéquation entre le système de culture et celui de l'élevage. La répartition de cheptel ne suit pas celle de la production fourragère car il existe des zones productrices de fourrages sans pour autant avoir un cheptel, alors que des unités de production qui pratiquent l'élevage ne disposent pas de ressources fourragères (Anonyme, 1986).
- b.** La faible diversification et la régression de la gamme des espèces fourragères pratiquées et les fourrages cultivés restent dominés par l'association de l'orge, l'avoine et en dernier la vesce-avoine en pluvial et la luzerne en irrigué. La vesce-avoine conservée dans de bonnes conditions donne un foin d'assez bonne qualité (0,7 UF/Kg de MS). Malheureusement, peu d'intérêt est accordé quant à sa conduite ce qui a pour conséquence la production d'un foin de qualité médiocre (0,4 UF/Kg de MS), (Ouknider et Jacquard, 1986).
- c.** Le faible développement et régression continue de la gamme d'espèces fourragères telles que le bersim, la luzerne, le sorgho et le maïs. fourrager (Anonyme, 1986).
- d.** L'absence de programme de formation et d'appui technique aux fourrages.
- e.** La mécanisation insuffisante et inadaptée dans certaines zones.
- f.** Le programme de multiplication de semences fourragères est nettement insuffisant et reste tributaire de l'importation (Hamrit, 1995).

g. Citons également que les fourrages naturels constitués par les prairies et les jachères pâturées sont souvent peu productifs.

h. L'idée de cultiver de l'herbe ne semble pas encore admise par la majorité de nos agriculteurs (Abdelguerfi *et al.*, 1987), c'est ainsi qu'il existe rarement des calendriers fourragers et la production fourragère est proportionnelle à la SAU alors que les besoins des animaux devraient être les principaux indicateurs pour élaborer le calendrier fourrager. (Hamrit, 1995).

#### **1.4. La place des fourrages dans les hautes plaines Sétifiennes**

Dans la région semi-aride des hautes plaines de Sétif, l'agriculture s'articule principalement autour de la production céréalière et de l'élevage, tout en combinant de façon complexe dans les systèmes de production d'autres spéculations agricoles (Benniou et Bernis, 2006).

Les hautes plaines semi-arides sétifiennes sont considérées comme une région céréalière par excellence. Cependant, ce caractère n'empêche pas le développement d'autres spéculations culturales et principalement si les possibilités d'irrigation existent. Sur la base d'une enquête conduite entre 2010 et 2011 auprès de 128 éleveurs choisis de manière aléatoire au hasard, par Bir, Yakhlef et Madani (2015), la moyenne de la surface fourragère principale (SFP) s'établit à  $7,60 \pm 10,3$  ha. Elle est constituée essentiellement par les cultures fourragères qui occupent une superficie moyenne de  $4,92 \pm 5,79$  ha, soit 64,7% de la SFP. Elles sont présentes dans 85,9% des exploitations enquêtées avec en moyenne une surface de  $4,92 \pm 5,79$  ha soit 16,1% de la SAU (Bir *et al.*, 2015).

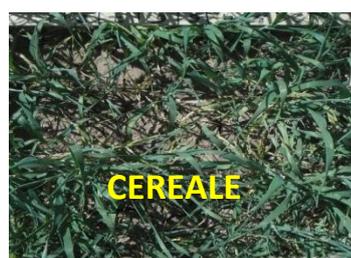
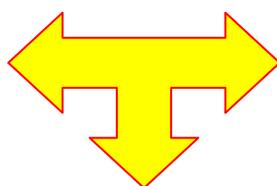
Les élevages laitiers dans la région semi-aride de Sétif sont, dans leur très grande majorité, peu autonomes. Cependant, l'autonomie est plus élevée pour les fourrages que pour les concentrés dont la dépendance est beaucoup plus forte. De plus, cette autonomie doit être acquise en préservant au mieux l'environnement contre les impacts négatifs occasionnés par la croissance de la production, ce qui constitue un choix impérieux pour la survie de l'ensemble de l'humanité (Chehat et Bir, 2008). Enfin, n'est-il pas plus judicieux d'améliorer l'autonomie alimentaire par le choix d'espèces et de variétés adaptées à chaque milieu, la maîtrise et le respect des itinéraires techniques de production, la maîtrise et la diversification des techniques de conservation des fourrages, l'accroissement de la part des surfaces fourragères et herbagères (SFP, prairies, cultures fourragères), l'entretien de la prairie et de la jachère et la valorisation des résidus de récoltes que de couvrir les besoins par des concentrés achetés.

## 2. Généralité sur les associations fourragères

### 2.1. Définition d'une association

Les associations de cultures sont utilisées depuis l'aube de l'agriculture mais elles ont progressivement disparu avec l'intensification des agro-écosystèmes, durant le 20<sup>ème</sup> siècle, au profit de systèmes fondés sur des peuplements cultivés monospécifiques. Ces systèmes sont actuellement remis en cause avec l'émergence des préoccupations d'économie d'intrants, la nécessité d'améliorer l'efficacité des facteurs de production et de préserver l'environnement et la biodiversité. De nombreuses études ont mis en évidence que les associations de cultures céréales-légumineuses seraient un moyen de mieux valoriser les ressources du milieu comparativement aux cultures « pures » ou monospécifiques correspondantes (Willey 1979 ; Ofori et Stern 1987 ; Willey 1990 ; Hauggaard-Nielsen *et al.*, 2003 ; Bedoussac 2009). Selon Willey (1979), une association est définie comme une culture simultanée de deux espèces ou plus sur la même surface pendant une période significative de leur cycle de croissance mais sans nécessairement être semées et récoltées en même temps.

Dans Plusieurs travaux de recherche (Willey, 1979 ; Horwith, 1985 ; Hauggaard- Nielsen *et al.*, 2001 ; Bedoussac, 2009 ; Louarn *et al.*, 2010 ; Lithourgidis *et al.*, 2011) ont montré les avantages des mélanges d'espèces (par comparaison avec les systèmes monospécifiques) et ce tout particulièrement dans les systèmes à bas niveau d'intrants et pour les mélanges de céréales et de légumineuses. Ainsi, nous observons actuellement un regain d'intérêt pour ces associations qui pourraient servir à la conception d'une agriculture plus écologique. Les associations céréales-légumineuses pourraient contribuer au développement d'une agriculture qui concilie productivité et haute valeur environnementale (Corre-Hellou *et al.*, 2013)



## 2.2. Fonctionnement de l'association

### 2.2.1. Forme d'interaction entre les espèces associées

Deux processus écologiques caractérisent les relations qui ont lieu entre les plantes pendant la phase d'association (Vandermeer, 1989; Willey, 1990 ; Hinsinger, 2011) : Dans les associations de cultures céréales-légumineuses, les espèces associées établissent des interactions négatives (compétition) ou positives (**facilitation et complémentarité de niche**) pour exploiter les ressources du milieu. Les légumineuses établissent des relations symbiotiques avec des microorganismes du sol de la famille des rhizobiums qui sont capables de fixer l'azote atmosphérique grâce aux nodosités des racines et permettent ainsi d'apporter à la plante une grande partie de ses besoins en azote. Cette faculté, qui est propre aux légumineuses, leur confère lorsqu'elles sont associées à des espèces non fixatrices d'azote comme les céréales la possibilité de mettre en jeu un processus de complémentarité de niche pour l'azote du milieu.

Une espèce peut affecter l'environnement de façon positive pour la seconde espèce. Cet effet est appelé **facilitation** ; il est généralement mesuré par un gain de rendement et/ou croissance par rapport à la même espèce cultivée en culture seule. Une espèce peut affecter l'environnement de façon négative pour la seconde espèce (extraction d'une ressource qui devient limitante pour la deuxième espèce, ombrage...). Cet effet est appelé **compétition**.

#### a. Complémentarité

La complémentarité est un phénomène qui se produit lorsque la production des deux espèces mises en association est augmentée sans que des interactions ne se produisent. Ce phénomène se produit lorsque les espèces associées exploitent des niches écologiques séparées. Cela peut provenir d'une différence dans les profondeurs et les densités d'enracinement des deux espèces liée à un écart de demande qui conditionne leurs accès à cette ressource (Corre-Hellou et Crozat, 2004 ; Corre-Hellou, 2005) ; la céréale est plus compétitive que la légumineuse pour l'utilisation de l'azote minéral du sol, « forçant » la légumineuse à dépendre davantage de l'azote atmosphérique pour sa nutrition azotée au moyen de la fixation symbiotique. Cette complémentarité de niche entre les deux espèces associées pour l'utilisation de ces deux sources d'azote explique en grande partie les performances généralement supérieures observées pour les associations par rapport aux cultures monospécifiques. Dans une association pois-orge, les céréales caractérisées par un système racinaire dense, profond et au développement rapide, sont ainsi plus concurrentielles que les légumineuses vis-à-vis de l'azote minéral du sol (Corre-Hellou *et al.*, 2007).

## **b. Interaction facilitation**

Le terme de facilitation regroupe les processus directs ou indirects (Bruno *et al.*, 2003) liés à la présence d'une espèce qui modifient de manière positive les conditions du milieu pour l'autre espèce associée. C'est le cas par exemple de la réduction des maladies (Trenbath, 1993) et des adventices (Hauggaard-Nielsen *et al.*, 2001) ou encore de l'augmentation de la disponibilité en nutriments comme le phosphore pour la céréale permise par le réglage de protons via la fixation symbiotique de la légumineuse (Hinsinger *et al.*, 2011).

Le principal enjeu lors d'une association de culture sera d'assurer la recherche de processus de facilitation tout en limitant les risques de compétition. Lors d'une association entre deux cultures de vente, les objectifs principaux sont d'améliorer la production pendant l'année en cours (i) en maximisant les phénomènes de facilitation et (ii) en réduisant le risque d'échec total de récolte. L'association de culture peut être utilisée afin d'assurer la stabilité des rendements d'une année sur l'autre (Lithourgidis *et al.*, 2011). La présence de deux cultures sur une même parcelle permet de réduire le risque d'échec total de la récolte (Clawson, 1985). Par exemple, un ravageur peut causer des dégâts importants sur une culture sans que cela n'affecte pour autant l'autre, ou encore, une culture à un stade physiologique donné pourrait être sensible à certaines conditions météorologiques sans que celles-ci aient un impact sur une autre culture à un stade physiologique différent.

## **c. l'interaction compétition**

La compétition est définie comme l'ensemble des effets que peut induire la présence d'une plante sur une autre en consommant ou en limitant l'accès à une ressource dont la disponibilité est limitée (Keddy, 2001). Ces effets peuvent modifier la croissance, la reproduction ou la survie des plantes et ont donc le plus souvent un effet négatif sur l'une ou les deux espèces. On distingue deux grands types de mécanismes de compétition : la compétition par **exploitation** et la compétition par **interférence**. La compétition par exploitation résulte du fait que les plantes entrent en concurrence pour les ressources abiotiques du milieu (eau, nutriments ou lumière...) ; cette compétition est donc liée au partage des ressources entre les espèces associées (Tilman, 2002). La compétition par interférence quant à elle n'est pas liée aux ressources. C'est le cas par exemple de l'allélopathie qui correspond à la capacité de certaines espèces de libérer dans le milieu des composés chimiques qui affectent directement la performance des autres espèces associées (Rice, 1984). Il est à souligner que les compétitions par exploitation sont bien mieux documentées que les compétitions par interférence dans les études des interactions inter- et

intra-spécifiques dans les systèmes multi-spécifiques. Par ailleurs, les interactions interspécifiques dépendent des ressources pour lesquelles les espèces sont en concurrence, des caractéristiques des espèces en interaction et enfin des mécanismes d'interaction (Keddy, 2001).

Chaque espèce possède des capacités compétitrices particulières dépendantes de ses propres tolérances et de son effet sur les autres plantes. On distingue ainsi : i) l'effet compétiteur qui correspond à la capacité d'une espèce à réduire les performances de l'espèce associée ; ii) la réponse compétitrice qui représente l'aptitude d'une espèce à tolérer l'effet compétiteur de l'espèce qui lui est associée (Goldberg et Landa, 1991). Le mode d'association et les espèces associées vont fortement impacter le partage des ressources entre espèces associées. De ce fait, les effets sur le rendement de la culture de vente seront différents en fonction des choix effectués. Dans le cas d'une association simultanée entre deux graminées, la compétition entre les deux espèces conduit à une diminution significative du rendement de 10% en moyenne du blé associé à de la féтуque rouge (Picard *et al.*, 2010). Känkänen et Eriksson (2007) ont montré que des espèces de graminées annuelles (*Lolium perenne* L.) affectaient négativement le rendement de l'orge de printemps, tandis que des espèces pérennes de légumineuses (*Trifolium pratense* L. et *Trifolium repens* L.) n'ont pas d'effet en agriculture biologique (Becker et Leithold, 2008 ; Hartl, 1989 ; Olesen *et al.*, 2009).

Cependant certains auteurs mettent en avant qu'une disponibilité limitée de l'azote du sol conduirait à favoriser le développement des légumineuses, en particulier lorsque des conditions climatiques très propices au développement de la légumineuse sont observées. Lorsque la biomasse produite par les légumineuses excède 2.5 t. ha<sup>-1</sup>, un phénomène de concurrence avec la céréale associée peut alors avoir lieu et avoir pour conséquence de diminuer la teneur en protéines du grain (Amossé *et al.*, 2013). Beaucoup d'études se sont centrées sur l'effet de l'association entre des légumineuses fourragères, les phénomènes des compétitions sont attendus pour être les plus importants, de nombreuses études menées sur les mélanges légumineuses à graines/céréales montrent que la biomasse et la densité des adventices sont diminuées dans le cas de l'association par rapport à la culture pure. Cependant, l'efficacité de l'association à contrôler les populations d'adventices sera différente en fonction des espèces testées et des doses de semis utilisées. Par exemple, dans le cas d'une association blé-pois, Bulson, (1997), observe une diminution des adventices de 50% par rapport au blé en culture pure et de 63% par rapport au pois en culture pure lorsque chacune des deux espèces est semée à 100% de la

dose recommandée constante entre la culture associée et les cultures monospécifiques correspondantes.

Une diminution de 23% et de 43% est observée par rapport au blé et au pois en culture pure respectivement. Cependant, cette conclusion n'est vraie que lorsque la part de céréale dans le mélange est suffisamment élevée. En revanche, dans plusieurs études, le développement de la flore adventice était comparable à une situation avec de la céréale en culture seule dans le cas d'une association orge-pois (Corre-Hellou *et al.*, 2011 ; Hauggaard-Nielsen *et al.*, 2001 ; Jensen *et al.*, 2006), ou blé-pois chiche (Banik *et al.*, 2006). Des études qui s'intéressent à l'effet des légumineuses fourragères associées en simultané avec une céréale à paille, Lanini *et al.*, (1991) montrent une diminution significative de la biomasse des adventices de 30% lors d'une association avoine-luzerne par rapport à l'avoine cultivée seule. Ainsi, dans plusieurs études réalisées avec du trèfle violet (Amossé *et al.*, 2013 ; Bergkvist *et al.*, 2011 ; Mutch *et al.*, 2003), il est observé un contrôle significatif des adventices avec une diminution de la densité des adventices de 30% à 45% et de leur biomasse d'environ 50%. Cependant, des résultats contradictoires ont été rapportés par Exner et Cruse (1993). Des différences d'efficacité à lutter contre les adventives en fonction des modes d'association peuvent être observées dans un nombre limité d'études. Ainsi Oswald *et al.* (2002) montrent que dans le cas d'associations maïs/haricot et maïs/soja, la densité de *Striga hermonthica* L.) était réduite de 60% dans le cas d'un semis en simultané tandis qu'un semis en relais (deux semaines après le semis du maïs) augmentait le risque d'infestation par cette adventice, même si ce dernier n'était pas significatif. Ces auteurs émettent l'hypothèse que le semis de la plante associée puisse créer des conditions plus propices au développement des adventices, risquant de stimuler leur germination.

### **2.3. Partage des ressources entre espèces associées**

On distingue généralement deux niveaux d'interaction : i) le niveau aérien pour l'interception du rayonnement et ii) le niveau souterrain, ou racinaire, pour le prélèvement de l'eau et des minéraux.

#### **2.3.1. Partage de la lumière**

De nombreuses études ont déjà illustré le lien existant entre la croissance, ou le rendement, et le rayonnement intercepté par diverses cultures (Watson, 1947 ; Bryson *et al.*, 1997). Monteith (1977) a ensuite suggéré que le rendement en matière sèche produit est une fonction du rayonnement intercepté par la canopée durant une période de croissance. Les longueurs d'onde approchant 550 nm et 700 nm s'avèrent être les plus sensibles à une variation de

chlorophylle selon certains auteurs (Lichtenthaler *et al.*, 1998 ; Carter et Knapp., 2001). En fait, certaines études affirment que la réflectance à 550 nm est la longueur d'onde la plus corrélée avec la chlorophylle (Thomas et Gausmann., 1977; Buschmann et Nagel., 1993) alors que d'autres identifient 700 nm comme présentant une meilleure corrélation (Carter *et* Knapp., 2001). Selon Blackmer *et al.*, (1994) Les longueurs d'onde d'absorption de la chlorophylle sont 680 nm pour la chlorophylle-a, 635 nm pour la chlorophylle-b et se situent aux environs de 470 nm pour les pigments de caroténoïdes.

Les plantes supérieures interceptent le rayonnement par l'intermédiaire de leurs feuilles et des autres organes verts, utilisent l'énergie lumineuse pour la photosynthèse des assimilats carbonés pour la production de biomasse. Lorsque les facteurs tels que l'eau, les minéraux, les maladies, les ravageurs et les mauvaises herbes ne sont pas limitants, le rendement et la matière sèche produite par une culture dépend essentiellement de la quantité du rayonnement absorbée (Loomis et Williams 1963). Dans les associations, en raison de l'hétérogénéité spatiale du couvert, l'énergie lumineuse est avant tout disponible pour l'espèce dominante. Par conséquent, l'efficacité d'interception du rayonnement ne dépendrait pas uniquement de l'indice foliaire et du coefficient d'extinction de chaque espèce (Sinoquet et Caldwell 1995), mais également de la hauteur et de la dynamique de croissance des espèces associées et de son architecture foliaire, ainsi que de sa hauteur et de sa dynamique de croissance relativement à celle de l'autre espèce associée (Fukai 1993 ; Midmore, 1993). La plupart des auteurs s'accordent sur le fait que le partage du rayonnement dans les associations est en premier lieu influencé par les compétitions verticales (Caldwell., 1987 ; Cudney *et al.*, 1991 ; Cenpukdee et Fukai., 1992) et en second lieu par l'orientation des rangs et le coefficient d'extinction des feuilles de chaque espèce.

Dans certaines situations, les différences entre espèces pour l'accès à la ressource lumineuse peuvent avoir des conséquences parfois fatales sur l'espèce dominée (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 (EUR) de l'espèce dominée (Marshall et Willey 1983 ; Stirling *et al.* 1990) comparativement à l'espèce « pure ». Par ailleurs, les phénomènes d'ombrage se traduiraient également au niveau des organes photosynthétiques par des feuilles plus fines, (Crookston *et al.*, 1975 ; Sivakumar et Virmani., 1980 ; Stirling *et al.*, 1990 ; Watiki *et al.*, 1993 ; Tsubo *et al.*, 2001).

En association, la structure foliaire des espèces cultivées dépendrait donc à la fois des caractéristiques morphogénétiques de chaque espèce mais également de 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. Le statut azoté qui est un indicateur du niveau de satisfaction de la demande en azote de la culture (Lemaire et Gastal 1997) constitue un facteur déterminant de la croissance foliaire (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. Gosse *et al.* (1986) ont mis en évidence sur des associations orge-pois que l'efficacité de conversion du rayonnement en biomasse du pois était inférieure à celle de la céréale, en raison principalement du coût énergétique de la fixation symbiotique. Enfin, Gastal et Bélanger (1993) ont, quant à eux, montré que l'offre en azote modifiait davantage la surface foliaire que l'efficacité de conversion du rayonnement.

Les interactions pour la lumière dans le cadre d'associations de cultures dépendent des caractéristiques morphologiques et phénologiques des espèces associées (port aérien, surface foliaire, vitesse de développement). L'ajout d'une composante végétale sur la parcelle entraîne généralement une meilleure interception du rayonnement total incident et donc une meilleure valorisation potentielle de ce rayonnement comparativement à une culture pure semée en rangs.

Plusieurs études sur les associations céréales-légumineuses de service identifient la lumière comme un élément déterminant de la réussite des couverts (Blaser *et al.*, 2011., Singer *et al.*, 2007 ; Thiessen *et al.*, 2001).

### **2.3.2. Acquisition de l'azote**

La mise en place des nodosités et de leur activité se fait progressivement chez les légumineuses (Voisin *et al.*, 2002). En début de cycle, les céréales et les légumineuses sont ainsi en compétition directe pour l'azote minéral du sol (via leurs systèmes racinaires) puisqu'il s'agit de la seule source d'azote alors disponible. Cela signifie qu'en début de croissance, le partage de l'azote minéral du sol serait déterminé par des écarts d'enracinements et de demandes entre espèces (Corre-Hellou., 2005). Or, les céréales et les légumineuses présenteraient des différences dans la vitesse de progression du front racinaire (Hamblin et Tennant., 1987) et des écarts de demandes dès le début du cycle en raison notamment d'une vitesse de croissance plus rapide de la céréale (Anderson *et al.*, 2004). La céréale devrait ainsi être avantagée dans la compétition précoce pour 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 (Jensen., 1996). Cette compétitivité plus forte de la céréale pour l'azote du sol se traduirait par une diminution rapide de la quantité d'azote minéral disponible dans l'horizon superficiel (zone de la fixation

symbiotique), qui aurait pour conséquence une augmentation de l'activité fixatrice de la légumineuse comparativement aux cultures « pures » et ceci afin de répondre à ses besoins en azote (Voisin *et al.*, 2002). Par conséquent, plus le pourcentage de l'azote absorbé par la légumineuse issu de la fixation symbiotique est important plus la quantité d'azote prélevée dans le sol par la légumineuse sera faible. Une augmentation de la fixation symbiotique se traduira ainsi par une disponibilité en azote pour le blé dur en association plus ou moins identique à celle du blé dur en culture « pure ». Or, si le rendement de la céréale en association est inférieur à celui de la culture « pure » (ce qui est quasi systématiquement le cas) alors la disponibilité en azote par plante, épis et grains de blé dur sera supérieure en association. Cette plus grande quantité d'azote remobilisée dans les grains (Ofori et Stern., 1987 ; Jensen., 1996) aura pour conséquence une amélioration de la teneur en protéines de la céréale. Par ailleurs, la demande en azote d'une céréale n'est pas linéaire mais dépend du stade de développement et du niveau de production. Ainsi, seul un écart de disponibilité en azote à un stade où les besoins de la culture sont forts permettra de réduire la carence azotée de la céréale comparativement à la culture « pure » et donc d'accroître sa qualité et sa production relative. Pour autant, dans le cas de disponibilités en azote non limitantes, cet effet sera faible voire nul justifiant l'intérêt des associations dans les systèmes à faible disponibilité en azote.

### **2.3.3. L'eau**

L'eau du sol est une ressource indispensable au bon développement des cultures présentes dans l'association, de plus, cette ressource est un des facteurs principaux déterminant le phénomène de nodulation des légumineuses (Mahieu *et al.*, 2009). L'eau contenue dans le sol est aussi nécessaire à la minéralisation des nutriments (Paul *et al.*, 2003) et à leur transport dans le sol vers les racines. L'utilisation de plantes de couverture permet d'améliorer la capacité de rétention en eau et la porosité du sol ainsi que la qualité de l'infiltration de l'eau grâce (i) à l'enrichissement en matière organique du sol (Scholberg *et al.*, 2010) et (ii) au développement racinaire du couvert (Carof *et al.*, 2007). La disponibilité de l'eau du sol n'a été que peu étudiée dans le cas d'association céréales-légumineuses de service. Cependant, les quelques études menées montrent, que sous climat tempéré, cette ressource n'est pas limitante pour la réussite de la culture principale étant donné la fréquence suffisamment importante des précipitations et le faible développement des couverts pendant la phase d'association (Blaser *et al.*, 2006 ; Thiessen *et al.*, 2001). Tout comme nous l'avons décrit dans le cas de l'azote, la différence de vitesse de croissance entre les deux espèces associées et les différences de

morphologies racinaires, doit permettre de limiter les zones de recoupement lors de la prospection racinaire. Le risque de compétition pour l'accès à cette ressource devrait donc être limité en cas de sécheresse pendant la période d'association. Malgré tout, la disponibilité en eau reste un facteur essentiel de la réussite de la plante de service.

#### **2.3.4. Le phosphore**

Élément essentiel pour la construction du végétal, les carences en phosphore induisent un mauvais développement et des pertes significatives de rendement. Malgré son importance dans la construction du végétal, cet élément reste moins étudié que l'azote ou l'eau en condition d'association. Il a été montré que l'association permettait d'avoir une meilleure disponibilité de cet élément au niveau de la rhizosphère (Betencourt *et al.*, 2012; Latati *et al.*, 2014). Dissanayaka *et al.*, (2015) montrent qu'une meilleure efficacité d'utilisation du phosphore est observée en association, mais que ces résultats peuvent différer en fonction du type de sol (vrai en regosol mais pas en andosol, sol généralement riche en matière organique). Plusieurs études ont mis en évidence l'importance du phosphore, non seulement dans la croissance des plantes (et des légumineuses) mais également dans la mise en place et le fonctionnement des nodules permettant la fixation symbiotique. En effet, plus le phosphore est un élément limitant, plus la nodulation sera diminuée que ce soit dans le cas des légumineuses à graines (Chaudhary *et al.*, 2008) ou fourragères (Suliman *et al.*, 2013).

### **2.4. Intérêt de l'association**

L'association graminée-légumineuse présente des avantages agronomiques, zootechniques et écologiques (Benjeddi *et al.*, 1998), et permet d'économiser des engrais azotés (Lecomte et Parache, 1993). La présence de vesce dans l'association améliore la production totale de matière sèche ainsi que la teneur en azote de l'avoine, de l'orge ou du triticale et la production de la graminée associée (Oukinder et Jaquard, 1988).

#### **2.4.1. Accroître les rendements et améliorer la qualité des grains et des fourrages**

Les deux raisons les plus souvent avancées pour l'adoption des associations d'espèces résident dans le gain de rendement global par rapport à des cultures « pures » (monospécifiques) et dans 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 1996). Un gain de rendement et l'amélioration de la teneur en protéines de l'ensilage, ainsi qu'en PDIN (Protéines Digestibles dans l'Intestin Permises par l'Azote) sont également des bénéfices attendus pour des associations fourragères comme le mélange maïs-soja (Boyeux et

Magnard., 2013 ; Coulombel et Roinsard., 2013). Quel que soit le type d'association, les différents travaux d'expérimentation menés sur l'étude du fonctionnement des associations de cultures montrent qu'en général, il y a une meilleure valorisation des ressources du milieu comparativement aux cultures monospécifiques correspondantes, conduisant à une productivité supérieure en terme de biomasse totale produite par l'association (Jensen., 1996 ; Hauggaard-Nielsen *et al.*, 2003 ; Hauggaard-Nielsen *et al.*, 2009).

L'association assure aussi une meilleure stabilité interannuelle des rendements (Lithourgidis *et al.*, 2006). Les associations céréales-légumineuses pourraient par conséquent présenter un intérêt aussi bien en agriculture biologique – pour améliorer la qualité des blés durs – qu'en agriculture conventionnelle pour réduire les intrants chimiques et améliorer les performances économiques et environnementales des systèmes de production.

#### **2.4.2. Autonomie alimentaire des élevages et meilleure stabilité face aux aléas**

Plusieurs éleveurs mentionnent les associations comme l'un des moyens de tendre vers l'autonomie alimentaire pour leur élevage. C'est le cas par exemple d'un éleveur ayant adopté ce type de culture qui indique que les associations céréales-légumineuses mises en place dans son exploitation contribuent à sa recherche de l'autonomie alimentaire pour son élevage bovins-lait (Boyeux et Magnard., 2013). Avec une association blé-triticales-avoine-pois, il mentionne également la souplesse permise par la pratique de cette association, puisqu'il a pu la récolter en grains ou en ensilage (ensilage fibreux avec une valeur alimentaire équilibrée, i.e. bon MAT, et un ratio PDI/UF autour de 100 pour les ruminants) en fonction des conditions climatiques (maturation et date de récolte) (Coulombel et Roinsard., 2013). En effet, dans des fermes avec un atelier de ruminants, le choix d'espèces qui peuvent être soit récoltées en grains, soit ensilées, offre une grande souplesse d'exploitation selon les besoins de l'année ou les conditions de développement de la culture. Les espèces de protéagineux à vocation mixte sont préférentiellement le pois fourrager et la vesce, du fait de leur capacité à produire une biomasse importante, mais la récolte en ensilage ne leur est plus exclusivement réservée (féveroles et lupins sembleraient aussi pouvoir être ensilés facilement avec de bonnes valeurs alimentaires). L'association destinée initialement à l'ensilage pourra être « menée à grains », si les récoltes fourragères déjà réalisées ou à venir sont suffisantes par rapport aux besoins de l'élevage.

Cela est dû en partie à une meilleure efficacité d'interception de rayonnement par l'association en comparaison avec les cultures pures. Différents travaux (Tsubo *et al.*, 2001 ; Tsubo and walker., 2004) montrent que cette plus grande interception de la lumière provient

principalement d'une complémentarité de l'architecture aérienne des deux espèces et d'une densité globale plus élevée en association qu'en culture pure ce qui permet une fermeture rapide du couvert. Corre-Hellou., (2005) montre que la dominance d'une culture par rapport à une autre dépend de la distribution et de l'évolution de l'architecture aérienne des deux espèces en association ainsi que de leurs vitesses de croissance au cours du cycle. Cette meilleure interception de rayonnement en association de culture est souvent citée comme la première cause de réduction des adventices (Tsubo *et al.*, 2001 ; Hauggaard- Nielsen *et al.*, 2001 ; Tsubo et Walker., 2004)

### **2.4.3. Contrôle des bioagresseurs**

Les cultures associées permettent un meilleur contrôle des ravageurs et maladies, qui s'explique par plusieurs phénomènes (Trenbath., 1993 ; Malézieux *et al.*, 2009) :

- L'effet « dilution » : lorsqu'un parasite attaque spécifiquement une des espèces de l'association, la « dilution » de cette espèce dans le couvert végétal (par rapport à une culture pure) rend le parasite moins efficace pour trouver et coloniser les individus de cette espèce-hôte.
- L'effet « barrière physique ». Ce phénomène se produit lorsque les individus de l'espèce non-hôte empêchent ou limitent l'accès du parasite aux individus de l'espèce-hôte.
- L'effet « habitat » : l'association d'espèces végétales à architectures aériennes différentes peut mettre en place un milieu favorable à des espèces auxiliaires.
- L'effet chimique : ce phénomène intervient lorsque l'une des espèces produit des substances qui ont un effet négatifs sur les maladies ou ravageurs susceptibles d'attaquer l'autre espèce.

Certains de ces mécanismes sont par ailleurs impliqués dans les mélanges de variétés (Litriceo *et al.*, 2015). On observe d'autre part une réduction de l'enherbement en cultures associées par rapport aux cultures pures (Corre-Hellou *et al.*, 2006). Deux phénomènes peuvent expliquer ces observations : la complémentarité des espèces cultivées en association, qui leur permet d'utiliser plus efficacement les ressources disponibles et limite donc l'accès des adventices à ces mêmes ressources ; ainsi la céréale exerce une compétition forte pour la lumière vis-à-vis des adventices (Corre-Hellou *et al.*, 2011) réduisant d'autant plus leur développement.

Par exemple, une réduction de l'anthracnose du pois a été observée en association pois-orge de printemps et pois-blé d'hiver (Schoeny *et al.*, 2010), alors qu'une réduction des pucerons verts du pois a été observée pour les associations pois-blé dur d'hiver (Ndzana *et al.*, 2014).

#### **2.4.4. Valoriser l'azote pour réduire l'utilisation des engrais et leurs impacts**

Hauggaard-Nielsen *et al.*, (2001) montrent que l'exploitation optimale des ressources en azote du sol par l'association diminue l'azote disponible pour les adventices et par conséquent leur croissance. Cette complémentarité a lieu lorsque les deux espèces en association utilisent différemment cette ressource, ou lorsqu'elles les utilisent à des périodes différentes de leur cycle de croissance. L'association d'une céréale avec une légumineuse par exemple est présentée dans différents travaux comme une association très compétitive vis-à-vis de la ressource en azote (Bulson *et al.*, 1997 ; Hauggaard-Nielsen *et al.*, 2001). La céréale très compétitive pour l'azote minéral du sol absorbe prioritairement cette ressource forçant ainsi la légumineuse à assurer ses besoins azotés par la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique ce qui expliquerait à la fois la réduction de la disponibilité de cette ressource pour les adventices et le gain en rendement (Hauggaard-Nielsen *et al.*, 2001). Cela montre l'importance des légumineuses dans l'approvisionnement du milieu en azote grâce à la fixation symbiotique (Maingi *et al.*, 2001). Pois fourrager-blé ou pois fourrager-avoine permettent une amélioration de la nutrition azotée de la céréale (Coulombel et Roinsard., 2013). Cette complémentarité observée dans le cas d'une association d'une céréale et d'une légumineuse peut également provenir d'une différence dans les profondeurs et les densités d'enracinement des deux espèces liée à un écart de demande qui conditionne leurs accès à cette ressource (Corre-Hellou et Crozat., 2004 ; Corre-Hellou., 2005). Dans une association pois-orge, les céréales caractérisées par un système racinaire dense, profond et au développement rapide, sont ainsi plus concurrentielles que les légumineuses vis-à-vis de l'azote minéral du sol (Corre-Hellou *et al.*, 2007).

Une réduction de l'azote minéral présent dans le sol après la récolte d'associations graminées-légumineuses par rapport aux légumineuses pures, et donc une réduction du risque potentiel de lixiviation. (Hauggaard-Nielsen *et al.*, 2009) mesurant la lixiviation des ions nitrate à l'aide de lysimètres a montré que celle-ci était plus faible après une association pois-orge de printemps qu'après les cultures pures correspondantes non fertilisées. L'association de culture est proposée aussi comme un moyen de réduire les risques de pertes d'azote minéral par lessivage (Hauggaard-Nielsen *et al.*, 2009) grâce à une meilleure valorisation de la ressource en azote par rapport aux cultures pures. La présence de la plante de couverture après la récolte de la plante commerciale permet aussi de réduire le stock d'azote susceptible d'être lessivé (Hartwig and Ammon., 2002) ce qui met en valeur l'avantage de l'utilisation des couverts végétaux en association avec une culture commerciale sur ce problème environnemental majeur.

### **2.4.5. Améliorer la performance environnementale**

Dans le cas de l'agriculture conventionnelle, une réduction de l'utilisation des fertilisants azotés sur l'association peut conduire à une réduction de la consommation énergétique, ainsi qu'à une réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) liées à la production et à l'application de ces engrais. (Pelzer *et al.*, 2012) une association blé-pois a des impacts d'environ 30 à 60% inférieurs aux cultures pures concernant le changement climatique (émissions de GES) et la demande en énergie. A surface équivalente, l'association réduit l'eutrophisation jusqu'à 77% dans certains systèmes testés. (Naudin *et al.*, 2014). En agriculture conventionnelle, la réduction de certains bioagresseurs pourrait s'accompagner d'une réduction de l'utilisation de produits phytosanitaires sur les associations. Ainsi, une réduction de l'Indice de Fréquence de Traitement) (IFT) pour l'association pois-blé a été observée comparativement aux deux cultures pures sur un réseau d'essais conduit en France (Pelzer *et al.*, 2012). L'impact de l'association de culture sur les ressources en eau a été aussi peu étudié en zones tempérées. Szumigalski et Acker (2008) montrent que pour l'association blé-canola, l'efficacité d'utilisation de l'eau dépasse légèrement celle des cultures pures. Ceci a été attribué dans le cas d'une association de blé-trèfle blanc à l'augmentation de la transpiration des plantes suite à l'augmentation de la biomasse totale produite en association ce qui entraîne une évapotranspiration plus élevée que celle des cultures pures (Thorsted *et al.*, 2006). D'autre part, les mélanges d'espèces présenteraient d'autres avantages comme : la réduction de l'érosion des sols par une meilleure couverture et enracinement (Anil *et al.* 1989), une amélioration de la résistance à la verse (Anil *et al.*, 1989), une réduction des risques de lixiviation de nitrates (Hauggaard-Nielsen *et al.*, 2009 ; Corre-Hellou., 2005) .

## **2.5. Les différentes organisations spatiales**

Dans la littérature, il est distingué quatre types d'associations (Vandermeer., 1989) dont l'utilisation dépendra de la séparation temporelle et des méthodes de semis envisagée (Lithourgidis *et al.*, 2011) :

### **2.5.1. Les associations en mélange**

Dans ce cas, les espèces sont totalement mélangées dans l'espace disponible. Il n'y a pas d'arrangement en rangs. C'est le cas des prairies temporaires (Vrignon-brenas., 2016).



### **2.5.2. Les associations en rangs**

Cette association consiste à cultiver en rangs alternés les différentes espèces de l'association sur des rangs séparés qui s'alternent dans l'espace. L'association peut aussi se faire sur le rang et consiste à semer les différentes espèces associées en mélange sur chaque rang (Vrignon-brenas., 2016)



### **2.5.3. Les associations en bandes**

Dans ce mode d'association, plusieurs rangs de chaque espèce de l'association s'alternent dans l'espace pour potentiellement permettre la mécanisation (à l'inverse de l'association en rangs) des différentes cultures tout en leur permettant d'interagir (Vrignon-brenas., 2016).



### **2.5.4. La combinaison du semis en rang de la culture de vente avec un semis en plein de la plante de service.**

Cette technique, permet de semer en cours de culture la plante de service dans la culture de vente avec du matériel de semis léger (semoir centrifuge, par exemple) contrairement au semoir en ligne qui nécessite un matériel de traction plus important et dont le passage peut entraîner un tassement du sol ou une dégradation de la culture en place (Edwards., 1998).



## **2.6. Plasticité phénotypique (choix variétale)**

Le choix variétal pour les associations d'espèces cultivées est un levier important qui reste encore peu exploité et ce d'autant plus que le matériel végétal utilisé a été sélectionné dans des cultures monospécifiques. Dès lors, il est raisonnable de penser que la diversité génétique des espèces et la variabilité de leur plasticité phénotypique pour leur utilisation en culture associée n'a pas été exploitée de façon optimale (Cenpukdee et Fukai., 1992 ; Davis et Wolley., 1993 ; Hauggaard-Nielsen *et al.*, 2001). Cette variabilité de réponse à l'association mettant en évidence l'existence des interactions génotype x système de culture a été abordée par différents auteurs tels que Francis (1981).

Les principaux critères pour choisir une variété selon (Boufenar *et al.*, 2004) : L'agriculteur dispose désormais d'un grand nombre de variétés présentant des caractéristiques multiples. Son choix ou l'adoption de telle ou telle variété doit reposer sur : (i) Une bonne connaissance de la zone où est localisée son exploitation, sans perdre de vue, les aptitudes agronomiques des variétés. (ii) Les aptitudes technologiques du grain de sa variété et donc l'assurance de son écoulement facile sur le marché.

Ces deux possibilités doivent être accompagnées par la pratique des techniques culturales adéquates pour que la variété choisie, soit à même de donner un niveau de productivité élevé.

## **2.7. Paramètres liés aux performances des associations fourragères**

### **2.7.1. Croissance aérienne (biomasse totale)**

Quel que soit le type d'association, les différents travaux d'expérimentation menés sur l'étude du fonctionnement des associations de cultures montrent qu'en général il y a une meilleure valorisation des ressources du milieu en association par rapport aux cultures pures, conduisant à une productivité supérieure en termes de biomasse totale produite par l'association (Jensen 1996; Hauggaard-Nielsen *et al.*, 2009). La biomasse comprend toute matière organique aérienne ou souterraine, qu'elle soit vivante ou morte. Le terme biomasse correspond à une définition commune de la biomasse au-dessus du sol et de la biomasse souterraine. La biomasse au-dessus du sol comprend toute la biomasse vivante au dessus du sol, y compris les tiges, les souches, les branches, l'écorce, les graines et le feuillage. Par contre, la biomasse souterraine correspond à toute la biomasse de racines vivantes ; les radicelles de moins de 2 mm de diamètre sont exclues, car il est souvent difficile de les distinguer empiriquement de la matière organique du sol. La biomasse sèche diffère de la verte du fait qu'elle est anhydre. La biomasse est une propriété de base qui est associée à de nombreux processus puisqu'elle décrit la quantification de la respiration des plantes sur la

surface observée (Fallon, 2003). Elle est impliquée dans un nombre de processus écologiques aussi bien en relation avec l'atmosphère qu'avec le milieu terrestre (cycle du carbone, cycle de l'eau). Des études scientifiques ont cherché, par le passé, à établir des méthodes précises, économiques et rapides, pour estimer la biomasse. Si les coupes de biomasse constituent une méthode simple à mettre en oeuvre, cette technique est limitée par sa lenteur, son coût, le caractère destructif des mesures, et surtout par le nombre de mesures nécessaires pour produire une estimation fiable. Ainsi, plusieurs chercheurs ont récemment publié des résultats proposant que les réflectances dans le visible, le proche infrarouge et le moyen infrarouge peuvent être reliées aux conditions de croissance. Ils ont montré que les régions spectrales du rouge et de l'infrarouge sont fortement corrélées à la biomasse (Jakubauskas et Price, 1997). L'estimation de la biomasse peut se faire en termes de matière sèche.

La production de la biomasse est l'un des valeurs les plus importantes dans l'évaluation de la valeur d'usage des associations fourragères. La croissance des végétaux en fonction du temps est l'expression la plus couramment utilisée, mais dans des études plus mécanistes, visant à comprendre le fonctionnement d'un couvert herbacé, la croissance peut-être aussi exprimée en fonction du rayonnement absorbé pour évaluer l'efficacité de conversion d'énergie lumineuse en énergie chimique.

La croissance peut-être représentée selon les espèces et donc difficilement comparables. Ces différences résident dans l'initiation de la croissance végétative et dans celle de la perte de tissus par sénescence (Bruinenberg *et al.*, 2002). Sur des espèces poussant dans des conditions non limitantes pour la croissance Lemaire *et al.*, (1999) ont montré que la vitesse maximale de croissance, représentée par la pente de la phase linéaire, est peu différente entre ces espèces à morphogénèse différente et ayant une capacité d'accumulation de biomasse contrastée. En revanche, les différences entre espèces sont beaucoup plus importantes dans la phase initiale de croissance exponentielle et dans la phase où la sénescence différencie la croissance nette de la brute. Ces différences reflètent respectivement la rapidité avec laquelle les plantes reconstituent leur appareil foliaire et leur capacité à accumuler la matière sèche produite (Lemaire *et al.*, 1999).

#### **\* Indice de productivité des associations fourragères**

Dans ce cas, le but est d'associer deux espèces qui ont pour vocation d'être récoltées, chacune des deux espèces est semée avec une densité inférieure à la dose utilisée en culture pure (dispositif substitutif). Le Land Equivalent Ratio (LER) et le Relative Yield Total (RYT) sont deux indices définis par De Wit et Van den Bergh (1965) et sont utilisés pour mesurer

l'avantage potentiel de production des deux cultures associées par rapport à la production de chacune des cultures cultivées séparément.

Le **LER** permet d'évaluer l'efficacité de l'association au cours de son cycle de développement. Il compare les rendements des cultures associées avec les rendements des cultures seules. Le LER correspond à la surface de cultures monospécifiques nécessaire pour obtenir le même rendement qu'en association.

Il se calcule de la manière suivante :

$$\text{LER} = \frac{\text{Rendement céréale Associée}}{\text{Rendement céréale Seule}} + \frac{\text{Rendement légumineuse associée}}{\text{Rendement légumineuse Seule}}$$

Si le LER = 1, il n'y a aucune différence entre les deux modes de culture.

Si le LER < 1, il y a une perte de rendement en association.

Si le LER > 1, il y a un avantage productif des associations.

#### **\*La Surface Spécifique Foliaire (SSF)**

La proportion de surface/le poids sec du limbe estimé en  $\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$  est la plus apte pour décrire cet axe pour des nombreux auteurs (Cornelissen *et al.*, 1996 ; Poorter et Remkes., 1990 ; Lambers et Poorter., 1992 ; Reich *et al.*, 1992 ; Wilson *et al.*, 1999).

La teneur en matière sèche des feuilles (TMS) : La relation entre le poids sec de la feuille et sa masse fraîche saturée en eau, exprimée en  $\text{mg.g}^{-1}$ , est considérée comme le meilleur indicateur pour prédire la stratégie écologique de l'espèce (Wilson *et al.*, 1999), et largement utilisée dans des différents programmes de recherche en écologie. Elle est une corrélation positive constatée entre la surface spécifique foliaire (SSF) et le taux photosynthétique net estimé par unité de masse de feuille (Reich *et al.*, 1997). La SSF est importante dans la photosynthèse (Reich *et al.*, 1992 ; Cunningham *et al.*, 1999 ; Wright *et al.*, 2001). La surface foliaire est exposée par unité de masse, donne une indication de la stratégie de la plante par rapport à la capture de la lumière. Selon ces auteurs, le lien causal avec TMS peut être dû au fait que la fraction du volume de la feuille occupée par le mésophylle (le tissu où se fait la fixation de  $\text{CO}_2$ ) est plus élevée dans les feuilles ayant une faible TMS. (Reich *et al.*, 1991). D'autres études suggèrent qu'une plus grande longévité de feuille est associée à une SSF basse (Reich *et al.*, 1997), et favorise la rétention des nutriments et améliore à long terme l'efficacité photosynthétique et l'usage de l'azote (Chapin *et al.*, 1993).

Or, la surface spécifique foliaire détermine principalement le taux de croissance relative (Poorter et Remkes., 1990 ; Garnier., 1992). De plus, la SSF est un facteur important dans la détermination de la capacité compétitive des espèces le long de gradients de fertilité du sol (Knops et Reinhart., 2000).

### **\*Le rapport feuilles/tiges (F/T)**

(Rapport feuilles/tiges) de la végétation, déterminant principal de la qualité fourragère, est influencé par le développement phénologique des plantes. Or, la qualité des fourrages baisse avec la maturité (Sanderson et Wedin., 1989 ; Bruinenberg *et al.*, 2002). La digestibilité des espèces fourragères est très élevée durant la phase végétative de la croissance (Terry et Tilley., 1964), et elle commence à diminuer avec la maturité des plantes. Ceci est dû à l'augmentation de proportion des composantes pariétaux (cellulose, hémicellulose et lignine) et la diminution de celles des substances cellulaires (Bosch *et al.*, 1992). Ajoutons à tout cela que même pour une espèce de graminées donnée, la digestibilité varie avec l'âge des feuilles (Groot et Neuteboom., 1997) et celui des tiges (Deinum et Dirven., 1971). Pour toutes ces raisons, avec l'avancement de la maturité du fourrage, la consommation volontaire par les animaux baisse généralement (Buxton et Mertens., 1995). L'âge et le stade de maturité, la fraction des feuilles vertes dans la biomasse produite a été depuis longtemps associée à la qualité des fourrages (Fick *et al.*, 1994 ; Smart *et al.*, 1998). Les feuilles, siège de la photosynthèse, sont les organes les plus riches en protéines, et autres substances nutritives et les plus pauvres en parois et constituants pariétaux (Jarrige *et al.*, 1995). Généralement, la teneur des feuilles des graminées en protéine est deux fois celle des tiges (Buxton et Mertens, 1995). Les tiges, correspondent à des tissus de soutien et de conduction à parois épaisses et lignifiées, elles assurent la rigidité et le port de la plante, mais constituent une résistance à la préhension et à la mastication par les herbivores (Jarrige *et al.*, 1995).

La proportion de feuilles vertes, de feuilles sénescents et les tiges dans la récolte et la maturité des tiges sont des déterminants importants de la digestibilité. En réalité, les feuilles sont riches en composantes de mésophylle ayant une digestibilité élevée tandis que les tiges possèdent une concentration élevée de sclérenchyme et xylème (Scehovic., 1979 ; Nelson et Moser., 1994). Il a été montré par le travail de Teery et Tilley (1964) que la feuille sénescence est moins digestible que celle verte, et que la digestibilité des limbes de graminées est peu différente de celle de gaines (Haggar et Ahmed., 1971 ; Duru *et al.*, 1995) durant la croissance végétative de la plante, et celle de gaines est similaire à celle des tiges (Hacker et Minson., 1981) en début de montaison. Cette digestibilité diminue avec l'âge plus rapidement dans les tiges que dans les feuilles (Terry et Tilley., 1964 ; Buxton et Mertens, 1995).

En résumé, la qualité du fourrage diminue au cours du temps à cause de : i) une diminution d'accumulation de feuilles vertes ce qui entraîne une réduction de rapport feuilles/tiges (Ugheghe., 1986) ; ii) une augmentation de la sénescence à la base du couvert

et de la masse des tiges, ce qui se traduit par une moindre digestibilité des tissus (Buxton et Calser., 1993).

### **2.7.2. Taux de couverture**

Le taux de couverture est une variable biophysique qui caractérise généralement la « quantité de matière » du couvert végétal. Cette variable représente donc la probabilité pour que le rayonnement solaire atteigne le sol sans avoir été intercepté par les feuilles. Elle est utilisée pour distinguer le sol de la végétation pour certains processus tels que l'évapotranspiration. La fraction de couverture dépend de certaines caractéristiques du couvert comme l'indice de surface foliaire, et en général de sa structure (Gitelson *et al.*, 2001). Le taux de couverture est une bonne mesure de la quantité de végétation présente. Sa dynamique peut être, par exemple, utilisée pour décrire la phénologie. Il est associé à de nombreux processus et il peut être utilisé comme indicateur pour moduler un certain nombre d'opérations culturales (Baret., 1991). L'estimation de la couverture végétale est exigée pour modéliser la productivité végétale (Gower *et al.*, 1999) et la gestion des ressources agricoles (Prince, 1991). En effet, le taux de couverture participe au cycle de carbone (par son activité photosynthétique) et de l'eau (évapotranspiration) ; il constitue un élément de contrôle des transferts d'énergie entre la surface et l'atmosphère en conditionnant l'interception du rayonnement solaire et les émissions thermiques, les échanges gazeux entre la basse atmosphère et la surface, et en régulant l'humidité et la répartition de l'énergie reçue (Garratt., 1993).

### **2.7.3. La symbiose Rhizobium-légumineuse**

La symbiose Rhizobium-légumineuse est le résultat d'une interaction hautement spécifique entre la plante et la bactérie. A la suite de mécanismes complexes de reconnaissance entre les deux organismes, via un dialogue moléculaire notamment, la bactérie induit chez la légumineuse, la formation sur les racines d'un organe spécialisé, appelé le nodule, à l'intérieur duquel la bactérie, intracellulaire, se différencie en bactéroïde capable de fixer l'azote atmosphérique en le réduisant, via le complexe nitrogénase, en ammonium (Perret *et al.*, 2000 ; Gibson *et al.*, 2008). Certaines légumineuses sont également capables de former des nodules sur les tiges, appelés nodules caulinaires (Giraud et Fleischman, 2004). L'établissement et le fonctionnement de la symbiose sont sous le contrôle génétique de chacun des deux partenaires. Les légumineuses permettent ainsi une réduction de l'utilisation des engrais chimiques azotés soit en utilisation directe (légumineuses alimentaires par exemple), soit lorsqu'elles sont utilisées en rotation de culture en tant qu'engrais verts. Les légumineuses

jouent donc un rôle essentiel dans les écosystèmes naturels, en agriculture et en agroforesterie, en colonisant des espaces pauvres en azote et en constituant une source majeure de fertilisants naturels et économiques pour les cultures. Cependant, beaucoup de légumineuses sont sensibles à la sécheresse et à l'acidité des sols, ce qui gêne l'expansion de ces cultures dans les régions à faible pluviométrie. Ainsi, l'identification d'espèces hôtes et rhizobiennes tolérantes au sel et/ou à l'acidité des sols sont une priorité dans le domaine de la recherche agricole (Graham et Vance, 2003). L'association symbiotique entre les rhizobiums et les légumineuses est très diverse et implique de nombreuses espèces chez les deux partenaires, végétal et bactérien.

# **Effet des facteurs climatiques sur la productivité des associations céréale/pois en zone semi-aride.**

Soumit au 'Journal of Fundamental and Applied Sciences'

## **Résumé :**

Une meilleure adaptation des cultures pluviales à la variation environnementale est devenue un impératif pour stabiliser les rendements dans le contexte des régions céréalières sèches soumises aux changements climatiques. Un essai d'observation de la variabilité interannuelle des rendements des deux associations fourragères orge-pois et triticales– pois en zone semi-aride de Sétif a été conduit pendant 3 campagnes agricoles (2013/2014, 2015/2016 et 2016/2017) à la ferme pilote SERSOUR, située dans la commune de Bir haddada, Algérie. Nous avons observé la présence d'un effet année significatif ; aussi, l'association triticales /pois est significativement plus productive (53.07 q MS/ha), comparée à l'association pois–orge (47.07 q MS/ha). L'association pois-triticales apparait mieux adaptée aux systèmes de production et situations climatiques de la région semi aride en vue de mieux valoriser les jachères. Un changement de pratiques agricoles, à travers l'adoption des cultures d'association légumineuses-céréales et un changement d'espèces cultivées est donc recommandé, en poursuivant l'amélioration génétique des ces espèces.

**Mot clé :** Sechresse, Association, Orge, Triticale, Pois, Biomasse.

**Abstract :** A better adaptation of rain-fed crops to environmental variation has become an imperative to stabilize yields in the context of dry cereal areas affected by climate change. Our study investigated the interannual variability of yields of two barley/pea and triticale/pea feed associations in semi-arid zones of Sétif during 3 cropping seasons (2013/2014, 2015/2016 and 2016/2017) at the experimental farm of "SERSOUR Salah", Sétif. We observed the presence of a significant year effect; also, the triticale/pea association was significantly more productive (53.07q.DM.ha<sup>-1</sup>), when compared to the pea/barley intercropping (47.07q.DM.ha<sup>-1</sup>). The pea/triticale association appears to be better suited to the production systems and climatic conditions of the semi-arid regions in order to better value fallow land. A change in agricultural practices, through the adoption of legume-cereal crops and a change in cultivated species is therefore recommended, by continuing the genetic improvement of these species.

**Key words:** Drought, intercrops, barley, triticale, pea, biomass.

## 1. Introduction

La production céréalière des zones pluviales sèches est faible et irrégulière dans l'espace et le temps (Ceccarelli, 2010 ; Menad *et al.*, 2011). La recherche d'une meilleure adaptation à la variation environnementale est devenue une nécessité pour stabiliser les rendements de ces régions (Kadi *et al.*, 2010 ; Meziani *et al.*, 2011). Les stress abiotiques qui caractérisent les régions arides et semi-arides sont représentés essentiellement par la sécheresse, les hautes températures de fin de cycle et la salinité.

L'adaptation variétale est recherchée vis-à-vis de ces stress (Baenziger *et al.*, 2006). Dans cette région, le régime pluviométrique est hivernal induisant le développement des stress abiotiques, sécheresse, et hautes températures, en fin de cycle de la culture qui coïncide avec le début de l'été. Sous ces conditions, la performance des cultivars est généralement très variable (Bouzerzour et Dekhili, 1995). Les hautes plaines sétifiennes sont habituellement présentées comme un terroir dominé par les céréales pluviales, blé et orge, et l'élevage. Les systèmes de culture sont basés sur une rotation céréale/jachère. La jachère subsiste encore et occupe annuellement de superficies importantes, évaluée à 40% de la SAU selon Abbas et Abdelguerfi, 2005. Dans les zones céréalières semi arides, les systèmes de production sont souvent soumis aux effets défavorables des aléas climatiques contraignants (Abbas *et al.*, 2001). Le remplacement des jachères par des cultures pour augmenter l'autonomie alimentaire des exploitations dans les zones Sud, peu pluvieuse, où les agriculteurs associent l'élevage à l'agriculture, constitue un enjeu stratégique. Etant donné que les potentialités de cette zone sont réduites comparées aux zones Nord et Centre, les cultures de remplacement sont les fourrages comme la vesce-avoine, l'orge en vert, le triticale, le pois-triticale et les légumes secs, telles que la lentille, qui peuvent contribuer à la satisfaction des besoins nationaux en protéines végétales et améliorer de manière substantielle la fertilité des sols (ITGC, 2009). Les légumineuses fourragères particulièrement peuvent être utilisées comme foin ou en grains pour l'alimentation du bétail. Elles se cultivent en association avec une céréale fourragère (l'avoine, l'orge ou le triticale). En effet, dans les régions semi-arides, l'alimentation des troupeaux est basée essentiellement sur le grain, les sous-produits des céréales, l'association vesce-avoine et la végétation des terres laissées en jachère.

Une telle stratégie d'alimentation extensive ne permet qu'un apport alimentaire faible au cheptel ; mais aussi, elle l'expose aux aléas du climat et aux carences chroniques en matières azotées digestibles (Mebarkia et Abdelguerfi, 2007). La diversification des cultures fourragères est très limitée, parmi les espèces cultivées, le pois fourrager est utilisé pour l'alimentation du bétail soit comme fourrage vert, soit sous forme de grains. Cette espèce, qui

a connu un développement conséquent dans les années 1980 en Algérie, a subit par la suite un recul important en matière d'utilisation. Il est à noter aussi que le pois est utilisé en associations fourragères en cultures pluviales (pois-avoine, pois /triticale, pois-orge). Bien que le genre *Pisum* soit assez bien représenté dans la flore algérienne, il semble que la totalité des variétés cultivées aient été introduites. Le pois a été introduit très récemment, et sa culture est restée assez limitée malgré son importance stratégique (FAO, 2006).

L'objectif de ce présent travail est d'analyser l'impact de l'effet climatique sur le rendement des associations fourragères à base de pois fourrager. Le choix des espèces est basé sur leur adaptation, leur valeur fourragère et leur compétitivité. Dans la région semi-aride située dans La zone Sud-Est de Sétif, recoit de 200 à 300 mm/an et est la plus touchée en région semi aride inférieure par les contraintes climatiques, comparativement à la zone centrale qui reçoit entre 300 et 400 mm/an (Baldy, 1974).

## **2. Matériels et méthodes**

### **2.1. Choix du site**

L'essai concerne un suivi durant 3 campagnes agricoles (2013/2014,2015/2016 et 2016/2017). Il a été installé à la ferme pilote Salah SERSOUR dans la commune de Bir haddada au Sud de Sétif (figure.1). Le sol de cette ferme est limono-sableux, avec 20% d'argile, 32% de limon et 48% de sable, et est limité en profondeur à 50 cm par une dalle calcaire (Kribaa *et al.*, 2001). Le pH est alcalin (8.17 à 8.26). Les valeurs de la conductivité électrique enregistrées restent très faibles, et oscillent entre 0.13 à 0.18 mmohs/cm (Bouzrara *et al.*, 2010).

L'essai de la station de Sétif, située dans la zone centrale, plus pluvieuse (139.62 mm entre septembre et mai) est suivi également durant la campagne agricole 2016/2017 sur le site de la station expérimentale agricole de l'Institut des Grandes Cultures (ITGC de Sétif, située à 4 Km au Sud Ouest de la ville de Sétif. Le site se situe à une altitude de 1081m. Les sols de la station sont des sols carbonatés, de la catégorie des sols steppiques, de profondeur faible et pauvres en matière organique ( Channafi et al.,2008).

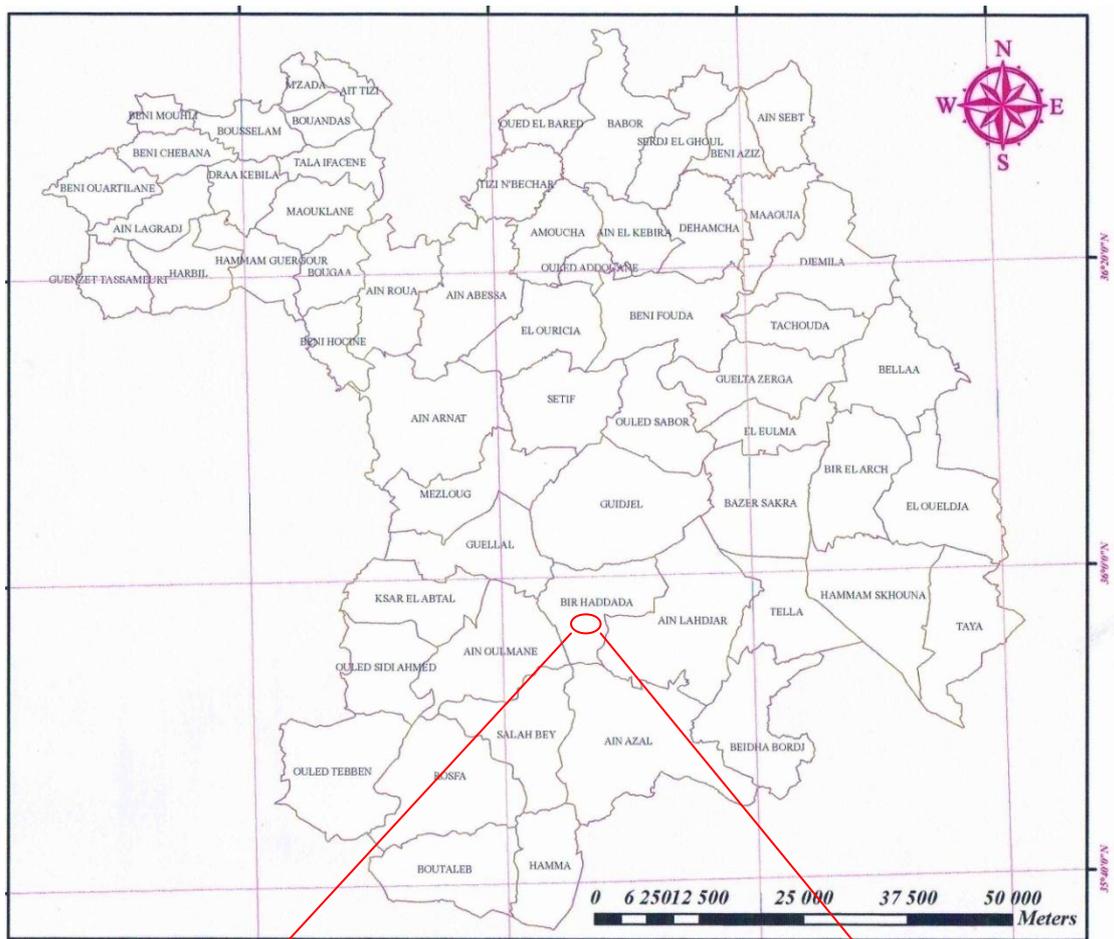


Figure1 : Localisation de la région d'étude  
 source : DPAT(2010) & Google Earth Pro.

## 2.2. Climat de la zone d'étude

Le climat de la région céréalière du semi-aride inférieur (SAI). Ce dernier reçoit en moyenne 200 à 300 mm. Dans ces milieux, l'aléa climatique et la sécheresse sont des données cardinales des systèmes de production (Bourbouze, 2000) ; le climat de la FP Sersour est caractérisé par une pluviométrie moyenne inférieure à 250 mm, un hiver froid, du gel printanier fréquent et l'avènement de la sécheresse associé à l'élévation de la température de l'air ambiant et au sirocco, vent chaud et desséchant, soufflant du sud, dès le mois de mai (Kribaa *et al.*, 2001).

Le cumul des précipitations enregistrées durant la campagne agricole d'étude (2013/2014) durant le cycle de croissance décembre-mai s'élève à 61 mm, par contre les précipitations enregistrées durant la campagne agricole 2015/2016 (174.8 mm) étaient plus élevées à celles de 2016/2017 (32 mm), ainsi qu'à celle de la station ITGC durant la même campagne agricole (83.02 mm). L'essai a lieu sur trois campagnes agricoles (3 ans d'expérimentation). Le mois de février était le plus pluvieux durant les campagnes d'étude. La température moyenne mensuelle la plus basse, a été enregistrée au cours du mois de janvier, avec 6.23°C. La température la plus élevée a été enregistrée durant la période de végétation au mois de septembre, 21°C en moyenne. D'après le diagramme ombrothermique de Gaussen appliqué à la région de Sétif, (zone centrale) la période sèche s'étale du mois de mai jusqu'à octobre (figure 2), par contre pour le site Sud, Bir Haddada, on constate que la période sèche s'étale du mois de mai jusqu'à décembre. Cette période sèche a été plus précoce durant l'expérimentation sur le site sud, elle a commencé en avril jusqu'à décembre, suite à des variations importantes des précipitations, très réduites par rapport à la partie centre, celle de la station ITGC de Sétif.

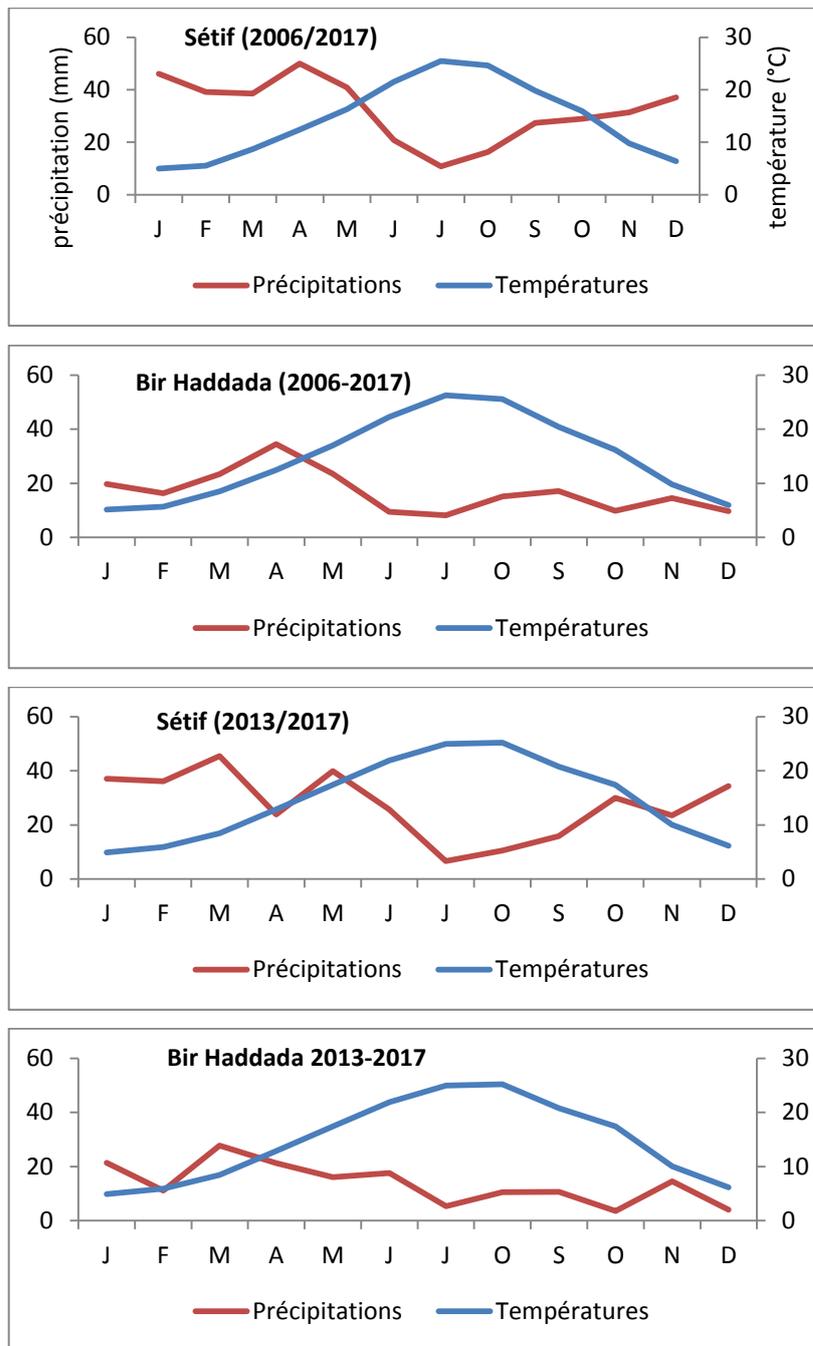


Figure.2 : Diagrammes ombrothermiques de Goussen des régions Centre Sétif et Bir-Haddada.

### 2.3. Installation de l'essai

Le dispositif utilisé est en blocs aléatoires, à trois répétitions. Chaque répétition comporte deux traitements, chaque une représente une association : Triticale/pois et orge/pois. Le semis a eu lieu au mois Novembre après un précédent de blé dur (100 Kg/ha de céréale, 40kg/ha de pois) dans le mélange selon leurs PMG.

Les productions annuelles sont exprimées en tonne de matière sèche (MS) à l'hectare. Le pourcentage de chaque partenaire dans l'association a été calculé à partir du poids de chaque constituant rapporté au poids total du mélange.

La date de coupe correspond au stade laiteux-pâteux du grain et formation des gousses de la légumineuse. La biomasse a été déterminée par la pesée de la matière sèche des parties aériennes des échantillons après séchage à l'étuve pendant 48h à une température de 80°C.

Les résultats obtenus sont soumis à une analyse de variance (ANOVA) à deux facteurs de classification (année, association) et les moyennes ont été comparées entre elles par le test LSD au seuil de 5%.

### **3. Résultats et discussion**

#### **3.1. Effet année**

La comparaison de la pluviométrie enregistrée entre la campagne agricole 2016/2017 et la période 2013 à 2016 (tableau.1), montre des différences sur le plan de la quantité et de la répartition. Cette campagne peut être qualifiée d'exceptionnelle et caractéristique des années sèches du climat des hautes plaines sétifiennes, de part son irrégularité inter saisonnière et une sécheresse de plus de 60 jours sans pluies durant les mois de février, mars et avril, qui coïncident avec la période allant des stades tallage et épiaison de la céréale et de la ramification jusqu'à la floraison de la légumineuse.

L'effet de l'année est significatif. Les teneurs en matière sèche moyennes annuelles des associations sont nettement plus élevées en 2015/2016 comparativement aux deux autres années, et ceci est en liaison avec les précipitations. Pour les deux associations, l'année 2015/2016 était caractérisée par un automne et un printemps pluvieux (178.8 mm), était plus favorable que l'année 2016/2017 (65 mm). Cette dernière (automne et printemps secs) s'est caractérisée par un taux de tallage faible, un dessèchement des feuilles, un taux de recouvrement du sol réduit, une précocité d'épiaison et de formation des gousses. Cela s'est traduit par des productions significativement plus faibles. Selon Kribaa (2003), la contrainte climatique agit par la faiblesse de la quantité d'eau et par sa mauvaise répartition inter et intra annuelle. Elle agit également par les basses (gel) et hautes températures (sécheresse accentuée par le sirocco) qui peuvent intervenir de manière précoce ou tardive et pénaliser la céréale.

Tableau 1: Pluviométrie saisonnière (mm) enregistré durant les campagnes agricoles 2013/014, 2015/16 et 2016/17.

Saisons	2013/14	2015/16	2016/17	2016/17
Traitements	Bir Haddada	Bir Haddada	Bir Haddada	ITGC Sétif
Automne	38	06	45	56.6
Hiver	35	15	12	67.92
Printemps	26	153.8	08	15.1
Total (mm)	99	178.8	65	139.62

### 3.2. Production de la matière sèche

L'ANOVA a révélé un effet année significatifs pour la production en MS de l'association orge/pois et significative pour la production en MS de l'association triticales/pois. La comparaison des rendements en matière sèche (figure 3) montre que l'association orge/pois a donné le rendement le plus faible (18.86 qMS/ha) en 2017, alors que, l'association triticales/pois a présenté le rendement le plus élevé (53.07 qMS/ha) en 2016. Le rendement en matière sèche a varié significativement avec les espèces de la céréale. Ceci confirme une meilleure aptitude de certaines espèces à produire une quantité supérieure de fourrage. L'orge est sensiblement plus affectée par les mauvaises années avec une chute de production de 47.07 à 18.86 q MS/ha, ce qui représente une chute de 47%. Ces résultats corroborent ceux obtenus par Ben Salem, (1991).

L'avoine et l'orge se sont révélées très sensibles à ces stress ; c'est pourquoi nous sommes intéressés aux associations avec le triticales, une "nouvelle" graminée.

Nous avons noté que la production était supérieure avec l'association à base de triticales sur les trois campagnes agricoles comparativement à l'association à base d'orge. Selon la figure 3, bien que la campagne agricole 2016/2017 fût moins pluvieuse par rapport aux années précédentes, nous n'avons pas observé de différences significatives entre la production de l'association triticales/pois dans les deux sites, Bir Haddada et l'ITGC de Sétif, (24.96qMS/ha vs 27.9qMS/ha respectivement). La production de l'association triticales/pois semble pouvoir maintenir le volume de la biomasse dans les cultures où l'eau reste un facteur limitant de l'élaboration de la biomasse des céréales et légumineuses, surtout en fin de cycle. Chennafi *et al.*, (2008) ont montré que la baisse de rendement final de la culture de la céréale est liées au stade d'avènement et au degré du stress hydrique survenant au cours d'une phase donnée.

Ces résultats témoignent de la meilleure adaptation du triticale aux conditions de sécheresse dans les conditions de l'essai. Ces résultats sont confirmés par les travaux de Hechmi (1999) qui montre que le triticale valorise mieux l'eau, contrairement à l'orge et à l'avoine. Il peut assurer une meilleure sécurisation de la production.

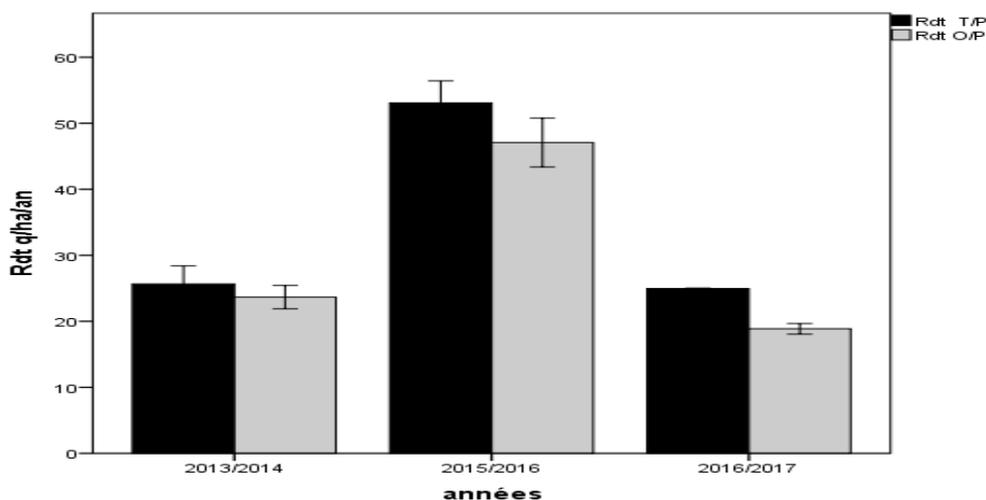


Figure 3 : Production de la matière sèche durant trois ans d'essai des associations :  
T/P : Triticale/pois, O/P : Orge/pois.

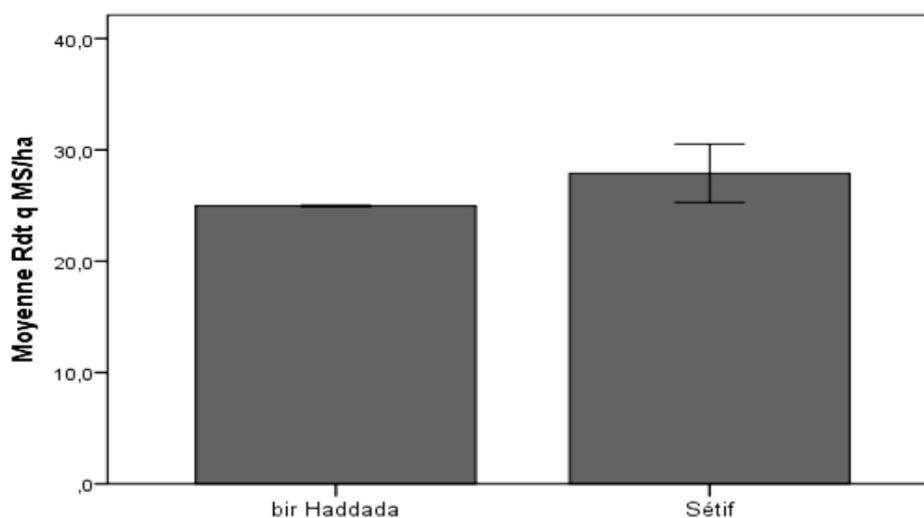


Figure 4 : Production de l'association triticale/pois dans la station Sud (Bir Haddada) et la région Centre de Sétif (ITGC) en 2016/2017.

L'agriculture pluviale est sensiblement affectée par la faiblesse et la mauvaise répartition des précipitations au cours de l'année. En effet, la majeure partie de ces précipitations tombe entre le mois d'octobre et février (Hafsi *et al*, 2009), cependant la saison sèche s'étend généralement entre le mois de mai et septembre. Les effets néfastes du vent dit "sirocco" au printemps et les gelées sur l'agriculture locale sont à craindre, notamment au cours du stade

végétatif critique. En effet, le sirocco qui se manifeste généralement dès la fin du printemps, accentue l'évapotranspiration des cultures aussi bien que les maximas thermiques (Souidi *et al.*, 2010). Cependant, les gelées tardives du printemps peuvent abaisser considérablement les rendements des céréales lorsqu'elles coïncident avec le stade de floraison (Rouabhi, 2014). La zone des hautes plaines sétifiennes est caractérisée par des basses températures, inférieures à 4°C, qui coïncident souvent avec la floraison des grandes cultures (Baldy, 1974).

L'analyse du régime thermique de la campagne agricole 2016/2017 (Fig.5) indique que les basses températures se situaient entre la mi-Décembre et mi-Mars, ce qui empêche tout développement de la végétation et ne permet pas aux eaux de pluies automnales et hivernales d'être valorisées par la culture. Les mois d'Octobre et Mai enregistraient des températures plus élevées, avec une moyenne de 19°C. La diminution de la pluviométrie et l'augmentation de la température a débuté dès le mois d'Avril jusqu'à la fin du cycle, coïncidant avec la période de floraison des céréales.

L'absence de la pluviométrie jumelée aux hautes températures durant la période de fin cycle du fourrage, induisaient un raccourcissement de la durée des phases consécutives du cycle de la culture. Mebarkia *et al.*, (2007) a supposé que les écotypes tardifs de ces deux espèces subissent fortement l'effet de la chaleur et de la sécheresse, contrairement aux écotypes précoces. Les écotypes tardifs assurent les meilleurs rendements en évitant les gelées ; en outre, ces écotypes restent assez précoces pour échapper aux stress hydrique et thermique, car la tolérance génétique est à prouver. Les génotypes tardifs accusent une réduction de la matière sèche produite, au stade épi à 1cm, supérieure à 40% entre une bonne et une mauvaise année; alors que les génotypes précoces se caractérisent par un taux de croissances élevées et une moindre variation inter environnement de la matière sèche produite, sachant que la majorité des auteurs sont unanimes sur le fait que la réduction de rendement en grains des repousses va de paire avec le retard de semis. Kang *et Kang* (1991) notent que le rendement fourrager le plus élevé est obtenu avec des semis précoces comparativement au semis tardifs et chez des génotypes alternatifs.

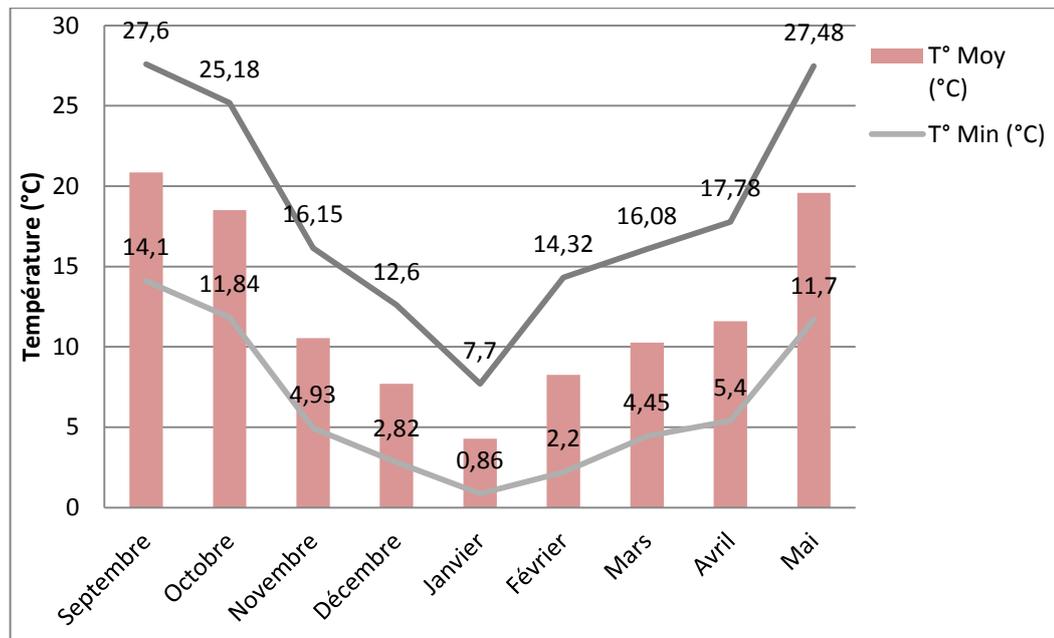


Figure 5 : Variation des températures mensuelles durant le cycle végétatif du fourrage au cours de la campagne agricole 2016/2017.

#### 4. Conclusion

Cette étude avait pour objectif de déterminer l'aptitude de plusieurs associations fourragères selon les caractéristiques climatiques interannuelles. Les essais réalisés en conditions pluviales en zone semi-aride, au cours des 3 campagnes agricoles ont montré qu'en mélangeant des légumineuses et des céréales on peut espérer bénéficier des avantages de chacune des espèces. Pour un usage en association, le mélange des espèces pourrait être intéressant pour leur aptitude à produire sous des conditions de stress. Les résultats obtenus dans cette étude montrent que les deux associations orge/pois et triticale/pois présentent des caractéristiques agronomiques intéressantes leur permettant de figurer parmi les espèces à retenir pour la mise en valeur de l'espace fourrager en zones semi-arides et ce, en fonction des caractéristiques des différents systèmes de production pratiquant la rotation céréale-jachère. Les associations pois/orge et pois/triticale ont fourni les résultats intéressants. Nous avons montré que la variation des facteurs climatiques (température et pluviométrie) entre les deux associations offre la possibilité de sélectionner l'association triticale/pois, plus appropriée pour répondre aux besoins des différentes formules retenues en matière de valorisation des jachères. Pour obtenir de bons niveaux de production de matière sèche destiné à l'alimentation de l'élevage, le choix devrait disposer d'une espèce plus précoce de triticale, avec un semis précoce pour bénéficier des pluies de septembre.

## **Chapitre II : Performances fourragères de l'orge (*Hordeum vulgare* L.), du triticales (*X Tritico-secale* Wittmack) et du pois (*Pisum Sativum* L.) et de leurs associations sous conditions semi-arides.**

**Publié** dans le journal : **European Scientific Journal**, en février 2017

**Résumé :** En milieux arides et semi-arides du sud de la méditerranée, qui se caractérisent par une faible pluviométrie, la valorisation du peu d'eau reçue, aussi bien en productions végétale qu'animale est d'une plus grande importance pour les agriculteurs. Sous ces conditions, la production végétale est faible et irrégulière à cause des effets, assez fréquents, des contraintes hydriques et thermiques. Pour amortir les effets de ces contraintes, malgré l'éventail restreint des espèces à adopter, la diversification des cultures végétales et la pratique de l'élevage sont recherchées. Une étude comparative des performances fourragères de l'orge, du triticales et de leurs associations avec le pois a été conduite au cours de la campagne agricole 2015/2016. Les résultats montrent que l'orge performe mieux en culture pure qu'associée avec le pois. Par contre, le triticales valorise mieux l'association avec le pois, présentant un gain de productivité de 11%, et améliorant la qualité du fourrage obtenu. Cette association constitue une des alternatives à la réduction de la jachère. Les résultats préliminaires de cette étude montrent que la diversification des cultures fourragères est possible et que divers aspects de cette diversification restent à étudier.

**Mots clés :** Associations, *Hordeum vulgare*, *Pisum sativum*, matière sèche, performance, semi-aride.

**Abstract :** Under arid and semi-arid environments of the South Mediterranean Sea, which are characterized by low and erratic rainfall, using efficiently the low amount of water received, in plant and animal productions is of paramount for producers. Under such growth conditions, plant production is low and irregular because of the effect of water and heat stresses. To minimize the effect of these constraints, despite the low range of the species to be adopted, crop diversification and animal production are targeted. A study comparing forage performances of barley, triticales and their associations with pea was undertaken during the 2015/2015 cropping season. The results showed that barley yielded best in sole crop than when intercropped with pea. Whereas triticales intercropped with pea exhibited higher forage yield, 11% productivity gain, and improved forage quality. This association could serve as an alternative to fallow reduction. These preliminary results indicated that, under semi-arid

conditions, forage diversification is possible and some aspects of this diversification need to be investigated.

**Key words :** Associations, *Hordeum vulgare*, *Pisum sativum*, dry matter, performance, semi-arid.

## 1. Introduction

Sous conditions semi-arides, la production végétale est précaire et irrégulière à cause des effets interactifs et négatifs, assez fréquents, des contraintes d'ordre aussi bien biotiques qu'abiotiques. Pour amortir les effets de ces contraintes, la production végétale est généralement associée à celle des élevages, afin de tirer meilleur parti des deux systèmes de productions et ainsi maintenir l'exploitation à un niveau économique acceptable. Dans ce contexte, la diversification des cultures fourragères, pour produire des quantités suffisantes et de qualité, est primordiale pour la coexistence des deux systèmes de production. Des systèmes de cultures tirant meilleur parti de l'environnement de production sont recherchés. En effet, selon Malézieux *et al.*, (2009), la biodiversité contribue à la réduction de la variabilité des productions sous conditions contraignantes. L'association des espèces ou de variétés différentes au sein d'une même parcelle est une forme de biodiversité (Willey, 1979). Ainsi, Lithourgidis *et al.*,(2011) mentionnent les avantages des mélanges de céréales et légumineuses sous conditions de faibles inputs. Les associations d'espèces, à faible compétition interspécifique, valorisent mieux les ressources disponibles du milieu et apportent un gain de productivité par rapport aux cultures pures (Kammoun, 2014).

Dans le cas des associations céréales-légumineuses, une meilleure efficacité d'utilisation de la ressource azotée est souvent notée. Le taux de protéines de la céréale augmente et la légumineuse gère mieux les apports d'engrais azotés, en améliorant l'autonomie azotée de l'agrosystème (Bedoussac et Justes, 2010 ; Fustec *et al.*, 2010). De plus, les cultures associées présentent une forme de garantie contre les aléas climatiques tels que le gel tardif et la sécheresse, du fait d'une meilleure résilience (Horwith, 1985 ; Corre- Hellou *et al.*, 2011). La pratique des cultures associées, qui consiste à mélanger au moins deux espèces, nécessite la mise en œuvre de connaissances nouvelles sur leur fonctionnement et leur gestion du fait que ces associations requièrent des techniques culturales adaptées, en termes de densité de semis, proportion du mélange, mode de semis, fertilisation azotée, espèces et variétés à adopter. Ainsi Davis et Wolley (1993) rapportent qu'une variété de maïs qui possède des entrenœuds courts associés à des feuilles larges ne convient pas pour une association avec le haricot, car elle engendre un ombrage excessif et une réduction du rendement de l'espèce à laquelle elle

est associée. Par contre des variétés possédant des entrenœuds assez longs et des feuilles étroites se marient mieux avec la légumineuse, assurant une bonne performance de l'association. Sinoquet et Caldwell, (1995) notent que l'effet d'ombrage d'une espèce en association peut être réduit avec des plantes à port dressé et qu'il faut, donc, utiliser, pour l'espèce dominée, des variétés à port étalé. Cudney *et al.*, (1991) rapportent que la différence de hauteur entre les composantes du mélange est un facteur déterminant la répartition de la radiation dans le couvert et donc les performances de l'association. Blaser *et al.*, (2011) mentionnent qu'un indice foliaire élevé de la céréale induit une réduction des performances de la légumineuse associée. Le choix variétal pour les associations d'espèces cultivées est un facteur important à étudier. L'objectif de cette étude est d'analyser le fonctionnement et la performance des cultures pures d'orge (*Hordeum vulgare* L.), de triticales (*X Tritico-secale* Wittmack) et du pois fourrager (*Pisum sativum* L.) et des associations orge-pois et triticales-pois, sous condition semi- arides.

## **2. Matériels et méthodes**

### **2.1. Site, climat, matériel végétal et dispositif expérimental**

L'expérience a été conduite sur le sol de la ferme Salah SERSOUR, située à 35 km au Sud de Sétif-ville (35°56' N, 05°32'E, 920 m). Le sol, limono-sableux, de pH 8.2, avec 20% d'argile, 32% de limons et 48% de sable, est limité en profondeur, à 50 cm, par une dalle calcaire. Le site expérimental appartient à l'étage bioclimatique semi- aride inférieur, dont le climat se caractérise par une pluviométrie en moyenne inférieure à 250 mm, un hiver froid, du gel printanier fréquent et l'avènement de la sécheresse associée à l'élévation de la température de l'air ambiant et au sirocco, vent chaud et desséchant, soufflant du sud, dès le mois de mai (Kribaa *et al.*, 2001). Le matériel végétal étudié est constitué de la variété d'orge Fouara (*Hordeum vulgare* L.), du triticales (*X. Tritico-secale* Wittmack) Juanillo, et la variété de pois fourrager (*Pisum sativum* L) Séfrou. Ces variétés ont été choisies sur la base de la disponibilité de la semence. Fouara est une orge à 6 rangs, dont le pedigree est Deir alla 106/Strain 205// Gerbel (Bensemane, 2015). Cette variété est multipliée et distribuée par la Ferme de Démonstration et de Multiplication des Semences de l'Institut Technique des Grandes Culture (FDMS, ITGC) de Sétif. Juanillo est une variété créée par le Centre International d'Amélioration du Maïs et du Blé (Cimmyt, Mexique), elle a été sélectionnée et actuellement multipliée par la FDMS de l'ITGC du Khroub (Zaghouane et Boufenar, 2002). La variété Séfrou est de type feuillu, à croissance déterminée et à grains mouchetés. Elle est multipliée par la FDMS-ITGC de Sétif. Les traitements étudiés sont constitués par les cultures pures des variétés Fouara, Juanillo, Séfrou et les associations Fouara/Séfrou et

Juanillo /Séfrou, semées à des doses de 1q de semence par hectare pour la céréale et 40 kg/ha pour la légumineuse, Les cinq traitements ont été répartis aléatoirement dans un dispositif en blocs avec quatre répétitions. Le semis a été réalisé la première décade du mois de décembre 2015 sur des parcelles élémentaires de 24 m de long par 6 m de large avec un espace inter-rangs de 0.17 m, soit une surface 144 m<sup>2</sup> par parcelle élémentaire. Le semis des associations a été effectué en mélangeant les semences des deux espèces dans la cuve du semoir. L'expérimentation a reçu, juste avant le semis, 1q/ha d'engrais phosphatés sous forme de MAP (Mono-Ammonium phosphate) dosant 26.93% P et 12.18% N. A la fin de l'hiver, au démarrage de la végétation, 60 kg/ha d'engrais azoté, Azosul, à 34% de N, ont été apportés.

## **2.2. Suivi, notations et analyses des données**

### **2.2.1. Recouvrement du sol par la végétation**

La cinétique de recouvrement du sol par la végétation a été déterminée par la prise de photos perpendiculairement au sol, entre le 15/03/16 et le 29/06/16. Les photos ont été prises par répétition, une fois par semaine, à l'aide d'un appareil photo numérique Canon 7MG pixels, sur des stations de 1 m<sup>2</sup>, fixées dès le départ de la végétation. La prise des images est effectuée entre 11h 00' et 12h 00', afin d'éviter les effets d'ombres. L'appareil photo est fixé au-dessus de la parcelle à photographier à une distance de 1 m. La surface couverte par les images est un carré de 0.5 x 0.5 m (Figure 1). Les photographies prises sont traitées par le logiciel Mesurim Pro. 3.3

(<http://www.ac-amiens.fr/pedagogie/svt/info/logiciels/Mesurim2/Telecharge.htm>) pour obtenir le taux de recouvrement du sol par la végétation. Le traitement des images est basé sur l'utilisation de différentes couleurs pour discriminer entre la végétation des espèces évaluées et le sol.



Figure 1 : Dispositif de prise d'images employé

### 2.2.2. Biomasse aérienne, ratio feuilles/tiges et Land equivalent ratio (LER)

La cinétique d'accumulation et de répartition de la biomasse aérienne est déterminée par des échantillonnages qui ont été réalisés au cours du cycle de développement de la végétation. Les stades végétatifs correspondants à ces échantillonnages sont le tallage, l'épiaison/floraison et la maturité physiologique. Pour ce faire la végétation provenant d'une station de 1 m<sup>2</sup> est fauchée par répétition et traitement et le poids de la matière fraîche récoltée est déterminé. Le bottillon de la végétation récoltée est subdivisé en deux échantillons, l'un sert à la détermination de la matière sèche produite et l'autre pour la détermination des constituants de la végétation. La matière sèche est déterminée par passage de la végétation à l'étuve pendant 48 h à 80°C. La végétation du second sous échantillon est subdivisée en limbe foliaire et tige. Les poids frais et secs des différents constituants sont déterminés. Utilisant les valeurs des différents constituants de la plante, le rapport feuille/tige est calculé. Le Land Equivalent Ratio (LER) a été déterminé pour les quantités de matière sèche produites au stade maturité (MS, q/ha), en utilisant la formule proposée par Willey (1979). Le LER représente la surface du sol nécessaire en culture pure pour obtenir la même production que l'association. Il a été calculé comme suit:

$$LER_{Fouara} = \frac{MS_{Fouara \text{ en association}}}{MS_{Fouara \text{ culture pure}}} + \frac{MS_{Séfrou \text{ en association}}}{MS_{Séfrou \text{ culture pure}}}$$

$$LER_{Juanillo} = \frac{MS_{Juanillo \text{ en association}}}{MS_{Juanillo \text{ culture pure}}} + \frac{MS_{Séfrou \text{ en association}}}{MS_{Séfrou \text{ culture pure}}}$$

### 2.3. Analyse des données

Les données ont été traitées par l'analyse de la variance avec le logiciel Costat, version 15.2.06 (<http://www.cohort.com>). La comparaison des moyennes entre modalités étudiées est faite relativement à la plus petite différence significative au seuil de 5% (Steel et Torrie, 1982).

## 3. Résultats

### 3.1. Plants installés et biomasse aérienne accumulée

Le contexte pédoclimatique du site expérimental, dont l'altitude moyenne est de 920 m, se caractérise par un sol sablo limoneux et une faible pluviométrie de 174.8 mm dont 12% ont été enregistrés en trois jours au cours des mois de novembre à février et les 88% restants ont été enregistrés en 8 jours, entre les mois de mars et mai.

La température moyenne annuelle de septembre à aout, est de 18.1°C. L'analyse de la variance du nombre de plantes levées indique un effet traitement significatif, suggérant des différences entre les traitements étudiés pour le nombre de plantes installées (Tableau 1). Les moyennes du nombre de plants levés sont proportionnelles aux doses de semis utilisées. Les pertes sont cependant plus importantes pour le pois en culture pure aussi bien qu'en association, que pour l'orge et le triticale. En effet, les variétés Fouara et Juanillo, semées à une dose de 100 kg/ha, soit à des densités théoriques de 230 et 268 graines/m<sup>2</sup> pour un poids de 1000 grains de 43.8 et 37.3 g, respectivement, présentent des moyennes de 191.3 et 188.0 plants installés/m<sup>2</sup>. Les pertes sont de l'ordre de 17 et 30 %, respectivement pour l'orge Fouara et le triticale Juanillo. Le pois, semé à une dose de 40 kg/ha, soit à une densité théorique de 75 plants/m<sup>2</sup>, pour un poids de 1000 grains de 53.2 g, enregistre une moyenne de 46.7 plants installés/m<sup>2</sup>, et une perte à la levée de 38%. Les associations, semées à une densité de 115/38 et 134/38 grains/m<sup>2</sup>, respectivement pour Fouara/Séfrou et Juanillo/Séfrou, présentent des moyennes de plants levés/m<sup>2</sup> de 76/15 et 88/14 plants/m<sup>2</sup> (Tableau 2).

Les pertes à la levée sont plus importantes chez les associations que chez les cultures pures. Elles sont, en moyenne, de 34% pour la céréale et de 60 % pour le pois. L'analyse des taux de pertes à la levée indique que l'orge Fouara est moins adaptée en association, comparativement au triticale Juanillo, quoique cette dernière présente un taux de pertes à la levée plus élevé, en culture pure. Ces variations sont dues essentiellement à la qualité de semence (faculté germinative) et à la capacité d'adaptation de chaque espèce aux conditions agro-écologiques de l'environnement de production. L'analyse de la variance de la matière sèche accumulée indique des effets culture, stade végétatif et une interaction culture x stades végétatifs significatifs (Tableau 3). Ces résultats suggèrent des comportements différents selon la culture (variété ou association) et le stade végétatif ciblé. L'effet principal culture n'est pas indiqué ni discuté parce qu'il présente moins d'intérêt comparativement à l'effet moyen stade végétatif et l'interaction culture x stades végétatifs.

Tableau1 : Analyse de la variance du nombre de plants levés/m<sup>2</sup> de l'orge Fouara, du triticale Juanillo, du pois Séfrou et des associations Fouara-Séfrou et Juanillo-Séfrou.

	Source	Répétition	variante	Erreur
	Ddl	2	4	8
Nombre de plants levés/m <sup>2</sup>		13.07	12120.90**	85.70

\*\* = effet significatif au seuil de 1%.

Tableau 2 : Valeurs moyennes du nombre de plants levés de l'orge Fouara, du triticale Juanillo, du pois Séfrou et des associations Fouara-Séfrou et Juanillo-Séfrou.

Fouara	Juanillo	Séfrou	Fouara/Séfrou	Juanillo/Séfrou	Ppds5%
191.3	188.0	46.7	91.3 (15 plants) <sup>a</sup>	102.0 (14 plants) <sup>a</sup>	17.4

a = Nombre de plants de Séfrou dans l'association.

L'analyse de l'effet moyen stade végétatif indique que la matière sèche accumulée augmente progressivement jusqu'à la maturité physiologique, passant d'une valeur moyenne de 14.57 q/ha, au stade tallage, à 46.90 q/ha au stade maturité physiologique (Tableau 4). L'analyse de l'interaction indique qu'au stade tallage les valeurs moyennes de la matière sèche accumulée, varient de 12.4 q/ha, rendement de l'association Fouara-Séfrou, à 17.0 q/ha, rendement du triticale Juanillo. La différence entre ces deux moyennes extrêmes n'est pas significative au regard de la plus petite différence significative au seuil de 5% (Tableau 4). Le stade tallage se caractérise surtout par la production de feuillage, qui n'apparaît pas comme une caractéristique discriminante entre les différents traitements étudiés. L'analyse de l'évolution de la végétation après ce stade et jusqu'au stade épiaison indique que l'orge Fouara présente une capacité d'accumulation de la matière sèche significativement plus élevée que celle qui caractérise le pois Séfrou, le triticale Juanillo et les associations Juanillo-Séfrou et Fouara-Séfrou. En effet la biomasse aérienne accumulée au stade épiaison est de 42.9 q/ha pour Fouara. Elle est de 34.6, 33.4 et 27.5/ha, respectivement, pour Fouara-Séfrou, Juanillo et Juanillo-Séfrou et uniquement de 26.9 q/ha pour le pois Séfrou (Tableau 4). Ces résultats s'expliquent par les différences inhérentes entre les trois espèces étudiées. L'orge Fouara présente des besoins moins importants en vernalisation et en photopériode, ce qui lui permet de répondre rapidement à la somme des températures accumulées, à la sortie de l'hiver, au contraire du triticale dont les besoins sont relativement plus prononcés, ce qui retarde son démarrage en végétation.

Tableau 3 : Analyse de la variance de la biomasse aérienne accumulée, du ratio de la matière sèche des feuilles /matière sèche des tiges et du taux de recouvrement du sol par la végétation aux stades végétatifs tallage, épiaison et maturité de l'orge Fouara, du triticale Juanillo, du pois Séfrou et des associations Fouara-Séfrou et Juanillo-Séfrou.

Source	Ddl	Matière sèche (q/ha)	Feuille/Tige (%)	Recouvrement (%)
Répétition	2	1.88	0.04	19.18
Culture ( C )	4	199.023**	0.62**	239.87**
Stade (S)	2	3944.84**	3.78**	1297.39**
C x S	8	85.65**	0.14**	515.08**
Erreur	28	8.16	0.03	15.81

ns, \*\* = Effets non significatif et significatif au seuil de 1%, respectivement.

Tableau 4 : Valeurs moyennes de la biomasse aérienne accumulée, du ratio de la matière sèche des feuilles /matière sèche des tiges et du taux de recouvrement du sol par la végétation aux stades végétatifs tallage, épiaison et maturité de l'orge Fouara, du triticale Juanillo, du pois Séfrou et des associations Fouara-Séfrou et Juanillo-Séfrou (effet moyen stade végétatif et interaction).

	Stade végétatif	MS (q/ha)	Taux de recouvrement	
			(%)	Feuillage/Tige (%)
Effet Stade Végétatif	Tallage	14.57	54.53	1.43
	Epiaison	33.05	56.74	0.90
	Maturité	46.90	39.64	0.43
	Ppds5%	2.14	2.97	0.13
	Stade végétatif	MS (q/ha)	Taux de recouvrement	
			(%)	Feuillage/Tige (%)
Fouara	Tallage	16.34	64.57	1.67
	Epiaison	42.90	62.20	0.67
	Maturité	50.20	44.80	0.32
Juanillo	Tallage	17.01	60.03	0.88
	Epiaison	33.43	57.93	0.62
	Maturité	52.40	37.86	0.25
Séfrou	Tallage	13.46	25.33	1.56
	Epiaison	26.86	60.40	1.55
	Maturité	31.75	52.97	0.84
Fouara-Séfrou	Tallage	12.26 (19.4%) <sup>a</sup>	65.59	1.51
	Epiaison	34.60 (3.6%)	53.80	0.91
	Maturité	47.07 (2.1%)	49.07	0.37
Juanillo-Séfrou	Tallage	13.81 (18.1%)	57.12	1.52
	Epiaison	27.48 (14.5%)	49.39	0.74
	Maturité	53.07 (15.4%)	49.08	0.35
	Ppds5%	4.77	6.64	0.29

a = % du poids de la légumineuse dans le mélange.

Dans ce contexte, Re Ruiter (2001) rapporte des différences significatives du rythme de développement entre l'orge, le blé et le triticale qui, pour fleurir, accumulent, respectivement, 842, 950, et 888°C/jours. Sous les conditions contraignantes de la présente étude, le pois Séfrou est inapte à produire plus de biomasse que la céréale, il est de ce fait peu attractif comme culture pure pour la région, lieu de l'étude. La biomasse accumulée à maturité est de 53.1, 52.4, 50.2, et 47.1 q/ha, respectivement, pour Juanillo-Séfrou, Juanillo, Fouara et Fouara-Séfrou. Elle est juste de 31.8 q/ha pour le pois Séfrou. Ces résultats indiquent que la capacité d'accumulation de la biomasse du triticale Juanillo se manifeste plus tardivement que celle de l'orge puisque cette variété arrive à égaler, au stade maturité, la matière sèche accumulée par l'orge Fouara. La différence de biomasse accumulée au stade maturité, entre Juanillo-Séfrou et Fouara-Séfrou, est significative et à l'avantage de l'association Juanillo-Séfrou (Tab.4). Les différences d'accumulation de la biomasse s'expliquent par des

différences d'efficacité d'utilisation des disponibilités du milieu notamment l'humidité du sol, l'azote et la radiation interceptée plus que par les différences du nombre de plants installés. En effet, De Ruyter (2001) rapporte une variation du nombre de plants installés entre variétés d'orge, de blé et de triticale allant de 94 à 147 plants/m<sup>2</sup>, cependant ces différences n'affectent pas significativement la quantité de biomasse accumulée à maturité. La part de la légumineuse dans le mélange Fouara-Séfrou régresse de 19.4%, au stade tallage, à 3.6% à l'épiaison, pour atteindre finalement 2.1% à maturité. Dans le mélange Juanillo-Séfrou, la part de la légumineuse, quoique plus élevée, régresse aussi de 18.1 à 15.4% entre les stades végétatifs tallage et maturité (Tab.4). Ces résultats suggèrent que le triticale Juanillo est moins agressif vis-à-vis de pois comparativement à l'orge Fouara. Corre-Hellou *et al.*, (2013) rapportent une variation importante de la part de chaque espèce dans le mélange fourrager, qu'ils expliquent par la disponibilité de l'azote du sol dont l'absence ou la faible disponibilité favorise la légumineuse. Lithourgidis *et al.*, (2011) mentionnent les avantages des mélanges de céréales et légumineuses sous conditions de faibles inputs. Le pois est plus sensible au déficit hydrique et aux températures élevées de fin de cycle que la céréale dont la présence en association permet un rendement du mélange satisfaisant au regard la production du pois en culture pure. Lecomte et Parache (1993) ainsi que Bedoussac et Justes (2010) mentionnent que l'introduction d'une légumineuse permet une amélioration de la qualité du mélange fourrager obtenu.

### **3.2. Recouvrement du sol, ratio feuille/tige et land equivalent ratio (LER)**

L'analyse de la variance du taux de recouvrement du sol et du ratio feuillage/tiges, mesurés aux stades végétatifs tallage, épiaison, et maturité, indique des effets principaux culture, stade végétatif et une interaction culture x stades végétatifs significatifs pour les deux variables (Tableau 3). Ces résultats indiquent des différences significatives pour ces deux variables entre les différents traitements étudiés. L'analyse de l'effet stade végétatif indique que ces deux variables régressent au cours du développement de la végétation. En effet le taux de recouvrement du sol par la végétation chute de 54.53% au stade tallage à 39.64% au stade maturité physiologique et le ratio feuilles/tiges baisse de 1.43% à 0.43% pour les mêmes stades végétatifs (Tableau 4). L'analyse de l'interaction indique des comportements contrastés au stade tallage, notamment entre le pois et la céréale. L'orge Fouara, le triticale Juanillo et les associations Fouara-Séfrou et Juanillo-Séfrou présentent un taux de recouvrement dont les valeurs moyennes sont respectivement de 64.6, 60.0, 65.6 et 57.1%. Avec une valeur de 25.3%, la moyenne du taux de recouvrement du pois est significativement la plus faible

(Tab.3 et Fig.2). Au stade épiaison, le taux de recouvrement du sol par la végétation reste similaire à celui mesuré au stade tallage chez l'orge Fouara et le triticale Juanillo, dont les moyennes sont de 62.2 et 57.9%. On note, par contre, une réduction significative chez les associations Fouara-Séfrou et Juanillo-Séfrou, dont les moyennes du taux de recouvrement prennent les valeurs de 53.8 et 49.4%, respectivement. Le pois Séfrou améliore son taux de recouvrement qui augmente à 60.4% (Tab. 4 et Fig. 3).

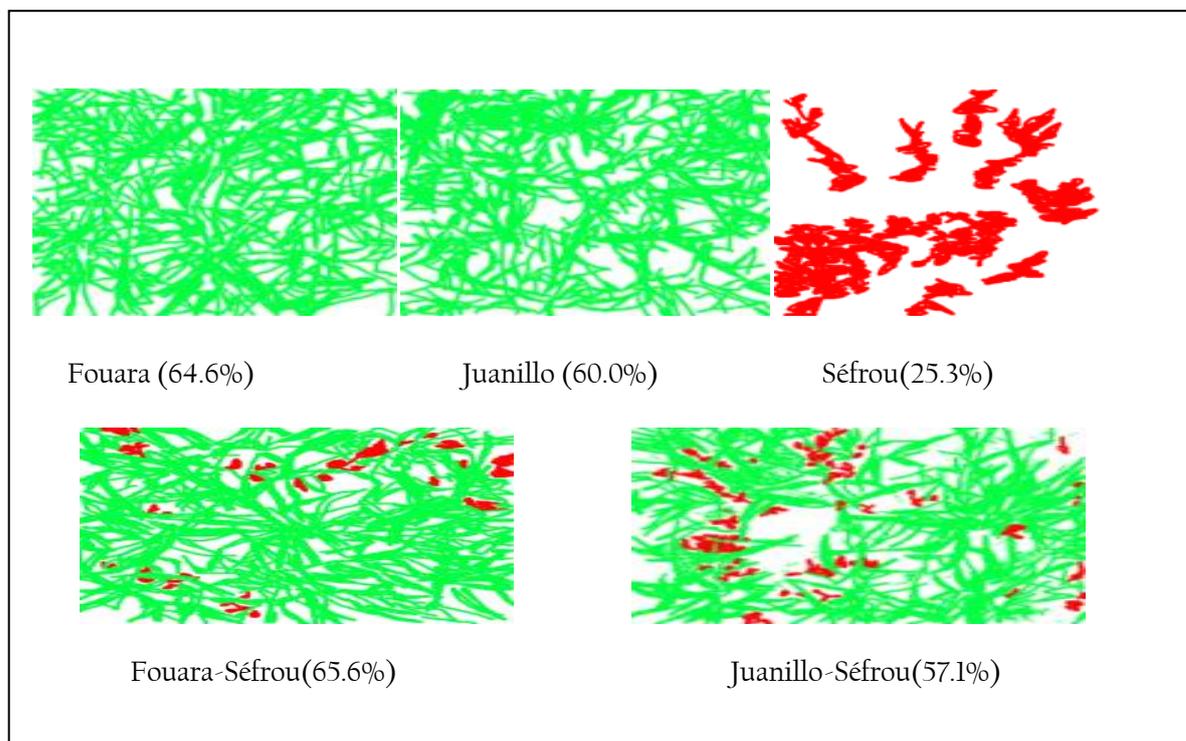


Figure 2 : Taux de recouvrement du sol par la végétation au stade tallage

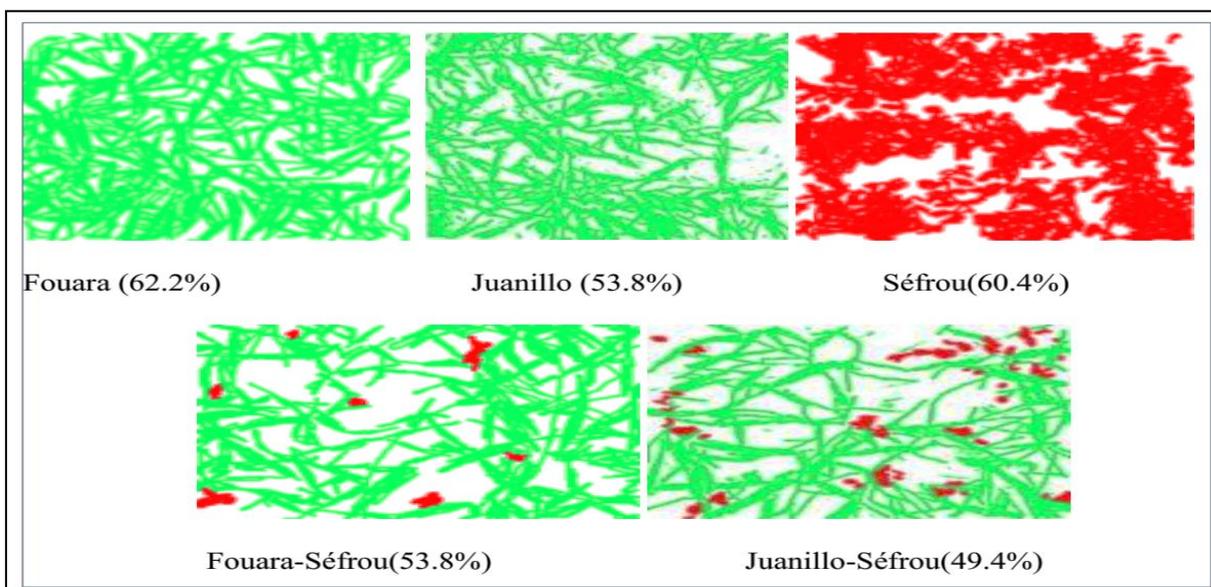


Figure 3 : Taux de recouvrement du sol par la végétation au stade épiaison.

Au stade maturité, cette variable est réduite significativement chez l'ensemble des traitements. La baisse est plus importante chez le triticale Juanillo et son association avec le pois et elle est moindre chez le pois Séfrou. Les moyennes du taux de recouvrement notées à maturité sont de 44.8, 37.86, 52.97, 49.07 et 49.08%, respectivement pour Fouara, Juanillo, Séfrou, Fouara-Séfrou et Juanillo-Séfrou (Tab. 4 et Fig.4). Selon Garratt (1993), le taux de recouvrement du sol par la culture représente la surface qui intercepte l'énergie solaire, nécessaire à l'activité photosynthétique et qui limite l'évaporation directe de l'humidité du sol, aidant à une meilleure efficacité d'utilisation des disponibilités du milieu. De Ruiter (2001) mentionne que l'efficacité d'interception de l'énergie lumineuse est à son maximum lorsque le taux de recouvrement atteint le seuil de 95%. Un tel seuil est loin d'être atteint dans le cas de la présente étude, ce qui suggère qu'une part importante de l'humidité du sol est perdue par évaporation, exagérant les effets des stress hydrique et thermique qui caractérisent le milieu de production sur la culture.

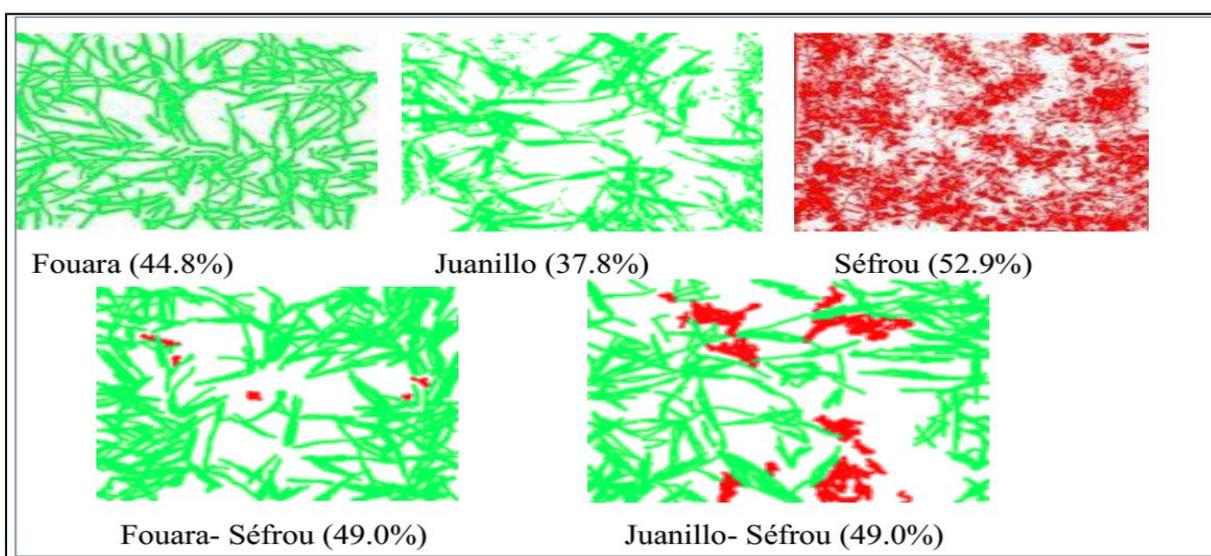


Figure 4 : Taux de recouvrement du sol par la végétation au stade maturité

Le rapport du poids du feuillage sur celui des tiges, au stade tallage, indique que le triticale Juanillo alloue plus de matière sèche aux tiges qu'au feuillage au contraire de l'orge Fouara, du pois Séfrou et des associations Fouara-Séfrou et Juanillo-Séfrou qui favorisent plus la production de feuillage au détriment des tiges. En effet le ratio du triticale est de 0.88 contre un ratio moyen de 1.57 pour les autres cultures (Tab. 4). Au stade épisaison, seul le pois Séfrou maintient un ratio équivalent à celui noté au stade épisaison alors que les autres cultures réduisent significativement leurs ratios à une valeur moyenne de 0.74. A maturité, Séfrou réduit de façon moins importante son ratio qui baisse à une valeur de 0.84, comparativement aux autres cultures étudiées dont les ratios atteignent une valeur moyenne

de 0.32 (Tab. 4). Les valeurs de ce ratio sont négativement corrélées aux quantités de biomasse accumulée ( $r = -0.8928$ ,  $p < 0.01$ ). Ceci rejoint les résultats rapportés par De Ruiter (2001) qui mentionne que la biomasse accumulée augmente en parallèle avec la réduction du ratio feuilles/ tiges.

La réduction du poids du feuillage au profit de celui des tiges affecte la qualité de la biomasse produite. Les valeurs prise par le LER sont, respectivement, de 0.95 et 1.11, pour l'orge et le triticale. Ces valeurs indiquent que la culture pure de l'orge Fouara est de 5%, en moyenne plus intéressante, que la culture de cette variété en association avec le pois. Par contre la culture en association du triticale Juanillo est de 11% plus intéressante que la culture pure. En d'autres termes, il faut une surface de 5% en moins pour l'orge et 11% de plus pour le triticale, en culture pure pour faire le même rendement de matière sèche à maturité physiologique que les associations Fouara-Séfrou et Juanillo-Séfrou. Ces résultats suggèrent que le choix des espèces à associer, voire même celui des variétés, s'avère important. Sahota et Malhi (2012) rapportent des valeurs du LER inférieur à 1 pour l'orge ayant reçu 80 kg N/ha et des valeurs LER supérieures à l'unité pour les associations orge-pois conduites sans apport d'azote. Des efficacités d'utilisation du sol variant de 8 à 17 % sont ainsi notées dans le cas des cultures associées ainsi qu'une réduction des apports d'azote minérale qui est fourni par le pois. Dans le cas de la présente étude, les cultures pures et associées ont reçu 32.6 kg N/ha.

#### **4. DISCUSSION**

En milieux arides et semi-arides du Sud de la méditerranée, qui se caractérisent, entre autres, par une faible pluviométrie, la valorisation du peu d'eau reçue, aussi bien en production végétale qu'animale est d'une plus grande importance pour les agriculteurs. Sous ces conditions, la production végétale est faible et irrégulière à cause des effets, assez fréquents, des contraintes hydriques et thermiques. Pour amortir les effets de ces contraintes, la diversification des cultures végétales et la pratique de l'élevage sont recherchées. Cependant, là où l'eau est peu abondante, l'éventail des espèces qui peuvent extérioriser leur potentiel de production est très restreint. L'orge se montre relativement tolérante aux contraintes climatiques qui caractérisent le sud des hauts plateaux algériens. Cette espèce, dont la culture est ancrée dans les pratiques agricoles de la région, est à destination fourragère. En dehors de la jachère enherbée, elle constitue l'unique ressource fourragère, utilisée sous diverses formes : Plantes immatures, chaumes, paille et grains. L'introduction du triticale et des associations orge-pois et triticale-pois est vue comme une diversification des cultures, pour produire plus de fourrage, d'une meilleure qualité.

Le triticale est une espèce qui produit un fourrage de meilleure qualité que celui de l'orge. Le pois fourrager est une légumineuse plus tolérante à la sécheresse comparativement à la vesce et la luzerne. Ces cultures semblent aptes à tirer meilleur parti des environnements arides et semi-arides. Les résultats de cette étude montrent des différences de capacité d'installation de la culture. L'orge présente une meilleure aptitude d'installation, alors que le pois est plus sensible aux conditions de la mise en place, avec 17% pertes à la levée pour le premier et 38% pour le second. Des trois espèces, l'orge est la plus précoce au stade épiaison où elle accumule plus de matière sèche aérienne, mais au stade maturité physiologique, elle est déclassée par le triticale. La différence de comportement est liée aux besoins en vernalisation et en photopériode, qui sont moins importants pour l'orge qui termine plus tôt son cycle.

Au contraire le triticale termine plus tardivement son cycle. Des différences de rythme de développement entre espèces sont rapportées par De Ruiter (2001). Les différences de matière sèche produite s'expliquent plus par des différences d'efficacité d'utilisation des disponibilités du milieu notamment l'humidité du sol et l'azote que par les différences du nombre de plants installés. L'analyse de la réduction de la part de la légumineuse dans le mélange fourrager suggère que le triticale est moins agressif vis-à-vis de pois que l'orge. Le taux de recouvrement du sol s'est réduit significativement à maturité. La baisse est plus importante chez le triticale Juanillo et son association avec le pois et elle est moindre chez le pois Séfrou. Les moyennes du taux de recouvrement notées à maturité varient de 37.86 à 52.97%. Un tel taux suggère qu'une part importante de l'humidité du sol est perdue par évaporation, exagérant les effets des stress sur la culture. A maturité, la réduction du poids du feuillage au profit de celui des tiges est relativement moins importante pour Séfrou que pour l'orge, le triticale et les associations. Une telle réduction affecte la qualité du fourrage produit dont la quantité est proportionnelle à celles des tiges. Les valeurs prises par le LER indiquent que la culture pure de l'orge Fouara est de 5%, en moyenne plus intéressante, que la culture de cette variété en association avec le pois. Par contre la culture en association du triticale Juanillo est de 11% plus intéressante que la culture pure de triticale. Ces résultats préliminaires suggèrent que le choix des espèces à associer, voire même celui des variétés, s'avère important. En effet l'avantage de l'orge en culture pure comparativement à l'association est lié à l'azote appliqué. En effet, Anderson *et al.*, (2004) rapportent que l'apport de l'azote favorise la compétition de la céréale et inhibe la fixation symbiotique de cet élément par la légumineuse. Faire l'économie de l'azote à apporter et à améliorer la

qualité du fourrage produit semble être des atouts qui militent pour la diversification des cultures fourragères dans la région ciblée par la présente étude.

## **5. CONCLUSION**

L'étude des associations graminées-légumineuses dans les conditions de conduite en sec des régions semi-aride montre que la production la plus élevée est obtenue par l'association triticale/pois, alors que la plus faible est produite par l'association orge/pois (53.07 vs 47.07 qMS/ha). L'orge performe mieux en culture pure qu'associée avec le pois. Par contre le triticale valorise mieux l'association avec le pois, présentant un gain de productivité de 11%, et améliorant la qualité du fourrage obtenu. Les résultats préliminaires de cette étude montrent que la diversification des cultures fourragères est possible et que divers aspects de cette diversification restent à étudier.

# **Effets de proportions au semis sur la productivité des associations céréales-légumineuses.**

Soumit à publication dans la revue **fourrage AFPP**

## **Résumé :**

L'objectif du travail est de comparer la production fourragère de 3 associations à base de triticale (T) et pois fourrager (P) et les 2 cultures pures correspondantes ; les semis des associations ont été effectués avec 3 proportions différentes. L'essai a été conduit dans la ferme de démonstration SERSOUR salah, à Sétif, située en milieux semi-arides et recevant 150 à 250 mm/an en moyenne de pluies. La valorisation de l'eau reçue, aussi bien pour la production végétale qu'animale est d'un enjeu capital pour les agriculteurs. Sous ces conditions, la production végétale est faible et irrégulière à cause des effets conjoints, assez fréquents, des contraintes hydriques et thermiques. La méthodologie a concerné l'analyse de la variance du rendement en biomasse, du taux de recouvrement du sol et du ratio feuillage/tiges, mesurés aux stades végétatifs tallage, épiaison, et maturité, et une estimation du taux de recouvrement et son rapport au rendement par la méthode de photographie verticale. Les effets des proportions au semis sont significatifs sur les variables de production. L'association triticale-pois à doses égales (T50%-P50%) offre des résultats significativement plus élevés pour la production (56qMS/ha en moyenne). Les résultats d'images photographiques verticales montrent que le taux de recouvrement de l'association (T50%-P50%) entre (53% et 65%), permanent et équilibrée pendant les différents stades par rapport aux autres modalités, LER est 1.7 de l'association (T50%-P50%) correspondant à 70% de gain de productivité par rapport aux cultures pures correspondantes. Les associations se sont avérées aussi plus efficaces dans le contrôle des adventices par rapport aux cultures pures.

**Mots clés :** Association –triticale-pois fourrager-stress hydrique - dose de semis..

## **ABSTRAT**

The objective of this work is to compare the forage production of 3 intercrops with triticale and forage pea (T-P) and 2 sole crops matching; the sowing of intercrops was carried out with 3 different proposals. The test was conducted in the demonstration farm SERSOUR salah, at Sétif, located in the semi-arid environments receiving 150-200mm/year an average rainfall. The variation of the water received both for plant and animal production is a key issue for farmers. Under these conditions crop production is low and irregular because of the joint

effects, fairly frequent, constraints of water and thermal stresses. The methodology concerned the analysis of the variance of biomass yield, the rate of land cover and ratio leaves/stem, measured at vegetative stages tiling, heading and maturation and an estimate of the rate of overlap and its relationship to yield by the method of vertical photography. The effects of the proposals sowing are significant on the production variables. Triticale-pea intercrop with equal dose (T50%-P50%) offers significantly higher results for production (56q MS/ha on average); the value of LER is 1.7 corresponding at 70% of productivity gain by contribution to the other corresponding sole crops. The recovery rate between (53% et 65%), permanent and balanced during the various stages by contribution to the other modalities corresponding. The intercrops have also been effective in weed control by contribution to the other corresponding sole crops.

**Keywords:** Intercrops, triticale, forage pea, water stress, seedling dose.

## **Introduction**

En milieux semi arides algériens, la céréaliculture occupe une place stratégique dans les systèmes de production ; toutefois, son rendement est influencé par les facteurs géographiques, climatiques et agronomiques. Parmi les variables agronomiques, le travail du sol, les systèmes de culture et les rotations culturales jouent un rôle central (Boulal *et al.*, 2007). Pour faire face aux défis de la raréfaction de l'eau et la durabilité des systèmes de production, l'innovation dans les techniques de travail du sol et des techniques de culture constitue un levier stratégique. L'intégration de nouvelles techniques plus efficaces a pour objectif d'augmenter la production agricole et d'améliorer les systèmes de cultures tout en préservant les ressources (sol, eau et atmosphère) pour les générations futures.

Les techniques de l'agriculture de conservation, telles que le semis direct est apparu comme une alternative à l'agriculture conventionnelle. La rotation des cultures demeure un élément important de maintien et d'amélioration des propriétés physico-chimiques du sol, de la fertilité du sol, d'élimination des adventices, considérée comme engrais vert et pour son effet positif sur la pollution et la limitation des maladies, ainsi que la stabilité du rendement et l'amélioration des systèmes de production (Berner *et al.*, 2013 ; Keith et Balduim, 2006 ) par ailleurs, la recherche de l'autonomie alimentaire de l'exploitation agricole, relativement fréquente en agriculture biologique, pose la question de l'amélioration et la valorisation des ressources fourragères (Coquil *et al.*, 2009). L'association céréales-protéagineux, composée d'une céréale et d'un protéagineux cultivés en mélange constitue la principale culture des éleveurs en agriculture biologique. L'objectif est de récolter un mélange productif, riche en

légumineuses, en évitant la verse tout en limitant la poussée des adventices. Ces associations sont récoltables en fourrage au stade laiteux-pâteux de la céréale et/ou en grains. Les mélanges céréales/protéagineux constituent un complément des rations à base de foins, plus spécifiquement comme complément azoté de rations de foins pauvres en azote, situation très fréquente en région semi aride algérienne. Mais le choix de mettre en culture des associations céréales/protéagineux et le choix de la composition de l'association ne peuvent pas être uniquement réalisés sur des bases zootechniques : l'implantation de ces associations se fait aussi sur la base de leurs intérêts agroenvironnementaux (fixation de l'azote de l'air, compétition vis-à-vis des adventices...). Ainsi, Coquil *et al.* (2009), a observé une corrélation plus élevée entre la surface spécifique foliaire et la palatabilité. Alors que la densité de semis influence positivement le rendement et les paramètres de croissance (Madakadze *et al.*, 2007). Depuis quelques années, le triticale, est progressivement adopté par les agriculteurs de la région semi-aride de Sétif (Algérie). En plus de sa rusticité, de sa productivité en grain élevée, et de sa bonne adaptation à diverses contraintes biotiques et abiotiques, les grains de triticale possèdent des qualités nutritionnelles appréciables et pourraient donc être incorporés dans les aliments concentrés des animaux (Beji et Khemir., 2012). Le triticale peut également être exploité en vert ou en ensilage en raison de son haut rendement en biomasse. Toutefois, c'est un fourrage dont la teneur en matières azotées totales est relativement faible ; c'est pourquoi il est recommandé de le cultiver en association avec une légumineuse fourragère. Le présent travail a été entrepris pour étudier les effets de la densité de semis sur la croissance et le rendement des associations triticale/pois en zone semi-aride ; il vise aussi à évaluer les variétés locales de triticale et de pois possédant des caractéristiques d'adaptation aux conditions climatiques locales.

## **I. Matériels et Méthodes**

### **1.1. Présentation de la région d'étude**

L'expérience a été conduite durant la campagne agricole 2015/2016 sur le sol de la ferme de pilote Salah SERSOUE, située à 35 km au Sud de Sétif-ville (35°56' N, 05°32'E, 920 m). Le sol est limono-sableux, de pH 8.2, avec 20% d'argile, 32% de limon et 48% de sable, mais limité en profondeur, à 50 cm, par une dalle calcaire. Le site expérimental appartient à l'étage bioclimatique semi-aride inférieur, dont le climat se caractérise par une pluviométrie moyenne de 250 mm, un hiver froid, du gel printanier fréquent et l'avènement de la sécheresse associé à l'élévation de la température de l'air ambiant et au sirocco, vent chaud et desséchant, soufflant du Sud, dès le mois de mai (Kribaa *et al.*, 2001).

## 1.2. Matériel végétal

L'étude a été effectuée sur des espèces céréalières et légumineuses. Les associations culturales et leurs cultures pures retenues sont le Pois/Triticale, variétés (Sefrou/Juanillo) du triticale (*X. Triticum-secale* Wittmack) Juanillo, et la variété de pois fourrager (*Pisum sativum* L.) Sefrou. Ces variétés ont été choisies sur la base de leur adaptation au milieu : Juanillo est une variété créée par le Centre International d'Amélioration du Maïs et du Blé (Cimmyt, Mexique), elle a été sélectionnée et actuellement multipliée par la station de production de semences de l'Institut technique des grandes cultures (ITGC) d'El Khroub (Zaghouane et Boufenar, 2002). La variété Sefrou est de type feuillu, à croissance déterminée et à grain moucheté. Elle est multipliée par la la station de production de semences de l'ITGC de Sétif.

## 1.3. Dispositif e xpérimental

Le dispositif expérimental est en blocs aléatoires ; c'est un dispositif en blocs à un seul facteur comportant quatre niveaux: Pois-triticale, triticale pur et pois pur, conduits en semis direct. Le seul facteur étudié étant les densités de semis des deux espèces dans le mélange ; Le choix des proportions en légumineuses et céréales en association est basé des résultats des travaux antérieurs (Bouzerzour et Makhoulf, 1989) : (50% - 50% : 125 grains céréale-125 grains pois) dans le mélange ; à raison de 50 kg céréale et 1q pois. Les traitements étudiés sont constitués par les cultures pures comme témoin Sefrou (J 0%-S 100%) et Juanillo (J 100%-S 0%), semées à des doses de 1,5q/ha céréale et 2q/ha légumineuse, alors que pour l'association (Juanillo/ Sefrou) trois modalités ont été retenues :(J 75%- S 25%) semées à des doses de 1q de semence par hectare pour la céréale et 40 kg/ha pour la légumineuse; (J50%-S50%) semées à des doses de 50 kg de semence par hectare pour la céréale et 1q/ha pour la légumineuse ; (J25%-S75%).semées à des doses de 25 kg de semence par hectare pour la céréale et 1,5q/ha pour la légumineuse selon leur PMG. Les cinq traitements ont été répartis aléatoirement dans un dispositif en blocs avec quatre répétitions. Le semis a été réalisé la première décade du mois de décembre 2015 sur des parcelles élémentaires de 24 m de long par 6 m de large avec un espace inter-rangs de 0.17 m, soit une surface de 144 m<sup>2</sup> par parcelle élémentaire. Le semis des associations a été effectué en mélangeant les semences des deux espèces dans la cuve du semoir CMA-SOLA mode TRISEM-294-ESP. L'expérimentation a reçu, juste avant le semis, 1q/ha d'engrais phosphatés sous forme de MAP (Mono-Ammonium Phosphate) dosant 26.93% P et 12.18% N. A la fin de l'hiver, au démarrage de la végétation, 60 kg/ha d'engrais azotés, Azosul, à 34% de N, ont été apportés.

## **1.4. Mesures effectuées**

### **La cinétique de recouvrement du sol par la végétation**

Cette mesure a été déterminée par la prise de photos perpendiculairement au sol, entre le 15/03/16 et le 29/06/16. Les photos ont été prises par répétition, une fois par semaine, à l'aide d'un appareil photo numérique Canon 7MG pixels, sur des stations de 1 m<sup>2</sup>, fixées dès le départ de la végétation. La prise des images est effectuée entre 11h 00'et 12h 00', afin d'éviter les effets d'ombres. L'appareil photo est fixé au-dessus de la parcelle à photographier à une distance de 1 m. La surface couverte par les images est un carré de 0.5 x 0.5 m (0.25m<sup>2</sup>). Les photographies prises sont traitées par le logiciel Mesurim Pro. 3.3. pour obtenir le taux de recouvrement du sol par la végétation. Le traitement des images est basé sur l'utilisation de différentes couleurs pour discriminer entre la végétation des espèces évaluées et le sol.

### **Biomasse aérienne, ratio feuilles/tiges et Land equivalent ratio (LER)**

La cinétique d'accumulation et de répartition de la biomasse aérienne sont déterminées par des échantillonnages qui ont été réalisés au cours du cycle de développement de la végétation. Les stades végétatifs correspondants à ces échantillonnages sont le tallage, l'épiaison/floraison et la maturité physiologique. Pour ce faire, la végétation provenant d'une station de 1 m<sup>2</sup> est fauchée par répétition et traitement et le poids de la matière fraîche récoltée a été ensuite déterminé. Le bottillon de la végétation récoltée est subdivisé en deux échantillons, l'un sert à la détermination de la matière sèche produite et l'autre pour la détermination des constituants de la végétation et portion des adventices. La matière sèche est déterminée par passage de la végétation à l'étuve pendant 48 h à 80°C. La végétation du second sous échantillon est subdivisée en limbe foliaire et tige. Les poids frais et secs des différents constituants sont déterminés. Utilisant les valeurs des différents constituants de la plante, le rapport feuille/tige est calculé.

**Le Land Equivalent Ratio (LER)** a été déterminé pour les quantités de matière sèche produites au stade maturité (MS, q/ha), en utilisant la formule proposée par Willey (1979). Le LER représente la surface du sol nécessaire en culture pure pour obtenir la même production que l'association.

## **1.5. Traitements statistiques**

Les données ont été traitées par analyse de variance à 5 facteurs et 2 interactions. Les facteurs sont le rendement de la biomasse, le rendement en grains, la biomasse des adventices, le taux de recouvrement du sol et le ratio feuille/tige. L'interaction concerne les

modalités des cultures (dose de semis) et le stade de développement. Les données collectées de l'expérimentation ont été soumises à une analyse de variance (ANOVA) avec le logiciel IBM SPSS statistic version 22.

## 2. RESULTATS

### 2.1. Effets stades de développement sur les productions des cultures

L'analyse de la variance du rendement en biomasse, le taux de recouvrement du sol et du ratio feuillage/tiges, mesurés aux stades végétatifs tallage, épiaison et maturité, indique des effets principaux culture, stade végétatif et une interaction culture x stades végétatifs significatifs pour les variables biomasse, taux de recouvrement et ratio feuillage/tiges (Tab.1). Ces résultats indiquent des différences significatives pour ces trois variables entre les différents traitements étudiés.

Tableau 1 : Analyse de la variance (ANOVA) de la biomasse aérienne accumulée, du ratio de la matière sèche des feuilles/matière sèche des tiges et du taux de recouvrement du sol par la végétation aux stades végétatifs tallage, épiaison et maturité du triticale Juanillo, du pois Séfrou et des associations Juanillo-Séfrou (Effets moyens stades végétatifs et interaction).

Source	Ddl	Matière sèche (q/ha)	Feuille/Tige (%)	Recouvrement (%)
Répétition	2	1.88	0.04	19.18
Culture ( C )	4	199.023**	0.62**	239.87**
Stade (S)	2	3944.84**	3.78**	1297.39**
C x S	8	85.65**	0.14**	515.08**
Erreur	28	8.16	0.03	15.81

ns, \*\* = Effets non significatif et significatif au seuil de 1%, respectivement.

Au stade tallage du triticale (Tab.2), la biomasse aérienne des couverts était de 14.57q MS ha<sup>-1</sup>, le ratio feuilles/tiges était de 1.43% et le taux de recouvrement était de 54.53% ; une diminution significative a été observée pour le ratio feuilles/tiges suivant le développement de la végétation jusqu'à 0.13 à la maturité. Au stade épiaison/floraison, le taux de recouvrement était de 56.74% tandis que le rendement biomasse était de 33.05q MS/ha. A la récolte, une baisse du taux de recouvrement était observée pour se situer à 39.64%, alors que le rendement en biomasse a augmenté et atteint 46.90q MS/ha.

Tableau 2 : Valeurs moyennes de la biomasse aérienne accumulée, du ratio de la matière sèche des feuilles/matière sèche des tiges et du taux de recouvrement du sol par la végétation aux stades végétatifs tallage, épiaison et maturité du triticale Juanillo, du pois Séfrou et des associations Juanillo-Séfrou.

	Stade végétatif	MS (q/ha)	Taux de recouvrement (%)	Feuillage/Tige (%)
Effet	Tallage	14.57	54.53	1.43
Stade	Epiaison	33.05	56.74	0.90
Végétatif	Maturité	46.90	39.64	0.43
	Ppds5%	2.14	2.97	0.13

## 2.2. Effets modalités de culture sur la couverture végétale

La méthode de photographie verticale permet de suivre l'évolution des taux de recouvrement du sol des deux espèces dans le mélange d'une parcelle (Fig.1). Au stade tallage, toutes les cultures avaient un taux de recouvrement supérieur à 50%, seul le pois pur avait un taux de recouvrement significativement inférieur (22%). Au stade épiaison/floraison une diminution du taux de recouvrement du triticale pur et de son association J/S1 (T75-P25) a été constatée, par contre une augmentation du pois pur et ses associations J/S2 (T50-P50) et J/S3 (T25-P75) a été observée pour atteindre respectivement 63.73%, 65.34% et 69.43%. A la maturité le taux de recouvrement des associations est supérieur à celle de leurs cultures pures ; ainsi, le taux de recouvrement a atteint 53.95% pour l'association J/S2 (T50-P50)

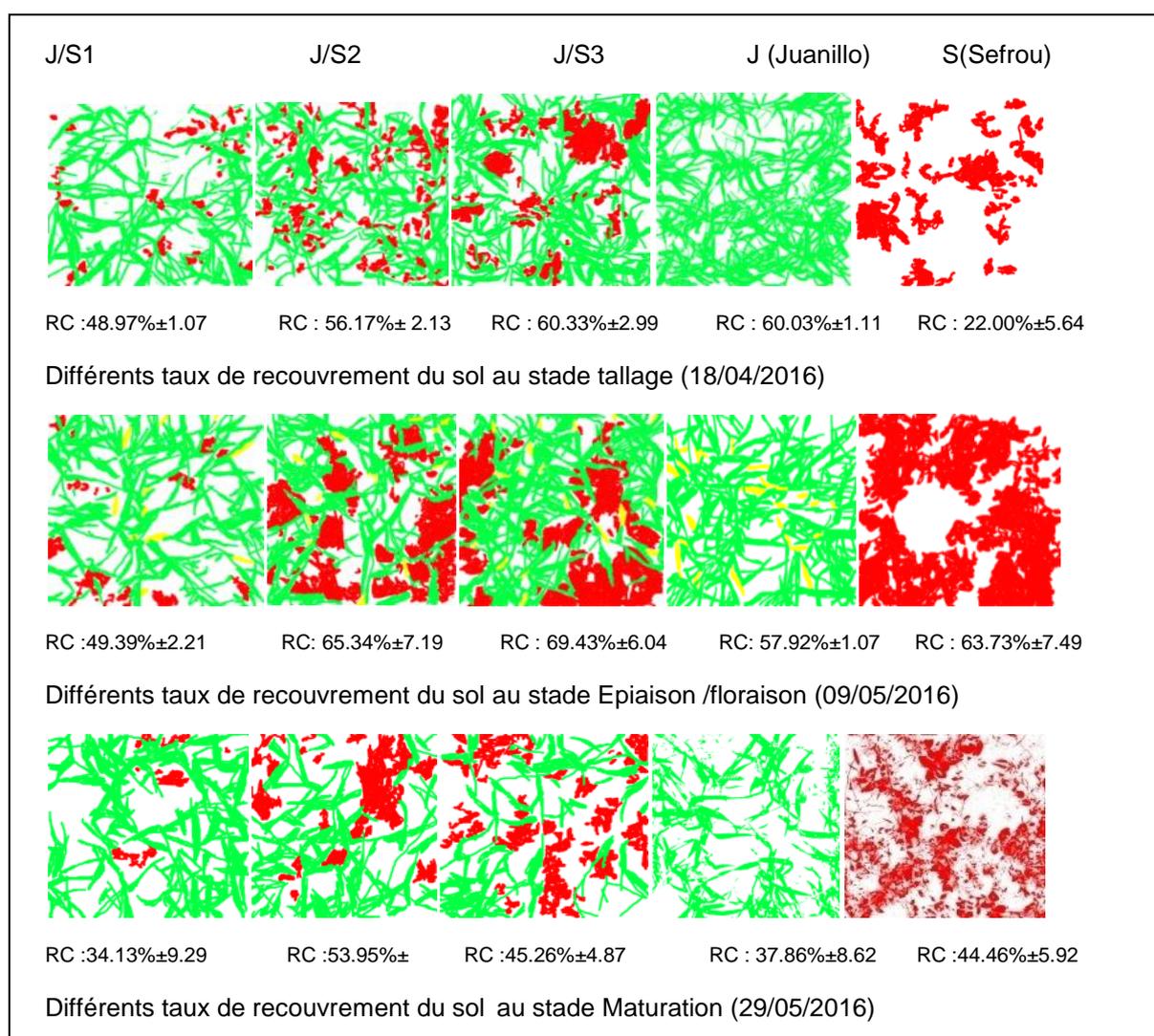


Figure 1 : Différents taux de recouvrement du sol (RC) au différents stades végétatifs de photographies numériques prises en visée verticale traités par logiciel mesurim des cultures J/S1 : Association Juanillo/Sefrou (75%-25%), J/S2 : association Juanillo/ Sefrou (50%-50%), J/S3 : Association Juanillo/Sefrou (25%-75%), J : Juanillo pur et S : Sefrou pur.

### 2.3. Effet culture sur le rendement fourrage

Nous avons observé une forte variabilité des rendements entre modalités de traitements, cette variabilité est expliquée par l'effet des choix techniques retenus en fonction des modalités de culture et des densités de semis appliquées sur les performances en milieu semi-aride. L'analyse de la variance (ANOVA) montre une interaction culture x rendement significative pour les deux variables. Dans les parcelles ayant la plus forte densité de semis du triticale, nous avons observé une augmentation significative de la productivité de la MS ; les rendements des cultures en association J/S2 et J/S1 sont respectivement de 55.50 et 53.07q de MS par hectare ; cette performance est proche de celle du triticale cultivé en pur, 52.40 q MS/ha. Par contre la productivité des cultures en association J/S3, à faible densité de semis de triticale 25%, est comparable à celle du pois 75%. La productivité en MS la plus faible est celle de J/S3 et du pois semé seul, qui produisent respectivement 34.93 et 31.75 (q MS/ha).

La composition de la biomasse des associations J/S1 est dominée par le triticale, qui représente 84.86% du total, alors que la part du pois était de 11.64%. En revanche pour l'association J/S2, la part moyenne du triticale et du pois étaient de 65.90% et 33.18% respectivement. L'association J/S3 est composée de 67.34% de triticale et de 30.20% de pois, dont le mélange est comparable en proportion à celui de J/S2 (figure 2).

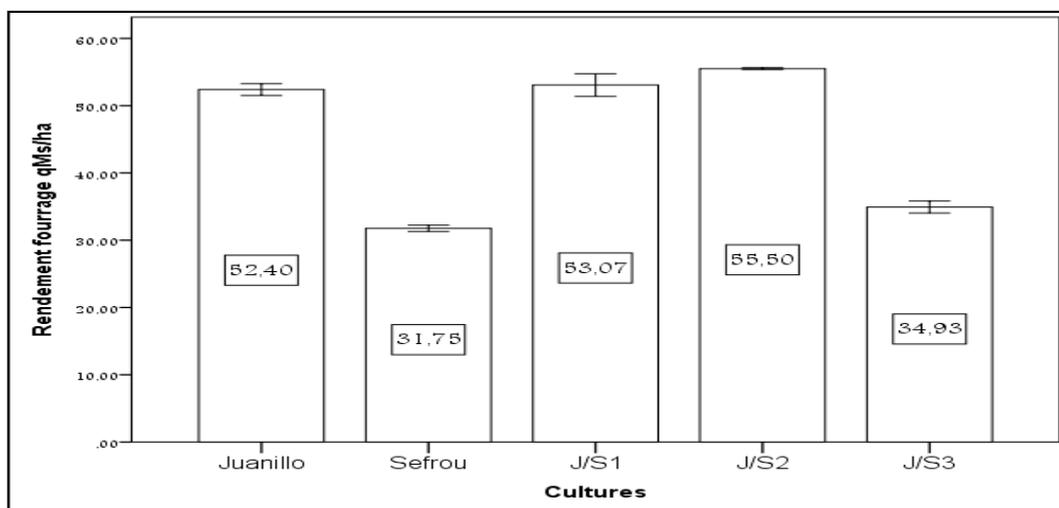


Figure 2 : Rendement fourrage selon les différentes modalités de la récolte.

### 2.4. Effet des modalités de culture sur le rendement en grains

Dans les associations triticale-pois, la proportion de chaque espèce dans le mélange à la récolte est variable mais elle est affectée par la densité de semis. L'association est aussi

influencée par la disponibilité en azote du milieu. La légumineuse est plus favorisée dans un milieu pauvre en azote.

D'après nos résultats, l'association en mélange J/S2 est plus performante que celles semées avec d'autres densités de semis ou celles en cultures pures. La densité 50-50 permet d'obtenir un rendement en grains significativement plus élevé, de 9.06q/ha (tab.3), une part de protéagineux dans le mélange aussi supérieure et un LER de 1.7. La supériorité de la production de grains du mélange (J/S2) est de 70% plus que celle de la culture pure. Même une faible dose de triticales (25% de la dose en pure) peut être rajoutée à la culture de pois, pour jouer le rôle de tuteur et d'amélioration du contrôle des adventices. Dans l'association triticales–pois fourrager J/S3 (T25-P75) le rendement en grains récolté est de 5.31q/ha avec un LER (0.84) ; cela confirme que les cultures pures produisent plus sur un hectare que la moyenne de l'association correspondante. Pour l'association triticales-pois fourrager de forte dose de triticales (75% de la dose pur) le rendement en grains récolté est de 7.63 q/ha avec un LER de 1.11 ; un gain de 11% plus que la culture pure a été réalisé, toutefois la source de protéine est moins importante car la céréale est dominante.

Tableau 3 : Rendement en grains par variété selon les différentes modalités et valeurs de LER

Traitements	Grain Juanillo	Grain Sefrou	Rendement en grains q/ha	
			Total	LER
1) Juanillo(J)	8.31	-	8.31	-
2) Sefrou(S)	-	2.91	2.91	-
3)J/S1	6.19	1.44	7.63	1.11
4)J/S2	6.29	2.76	9.06	1.7
5)J/S3	4.37	0.94	5.31	0.84
ddl	3	3	4	2
Erreur standard et signification	0.65 <sup>ns</sup>	0.30 <sup>**</sup>	0.70 <sup>***</sup>	0.90 <sup>***</sup>

## 2.5. Effet des cultures sur les adventices

Selon la figure 4, au moment de la récolte une diminution des adventices a été observée pour les trois associations, réduisant en moyenne de 90% l'équivalent de leur densité dans le traitement pur. En effet, la biomasse d'adventices observée sur le traitement pur était significativement supérieure à celle observée sur les traitements d'association, 2.38 q MS/ha pour le triticales pur ; le maximum est atteint dans le pois pur (5.90 q MS/ha), où la compétition céréale-légumineuse a été la plus faible. Nous n'avons pas observé de différences significatives de croissance des adventices entre les modalités d'associations retenues.

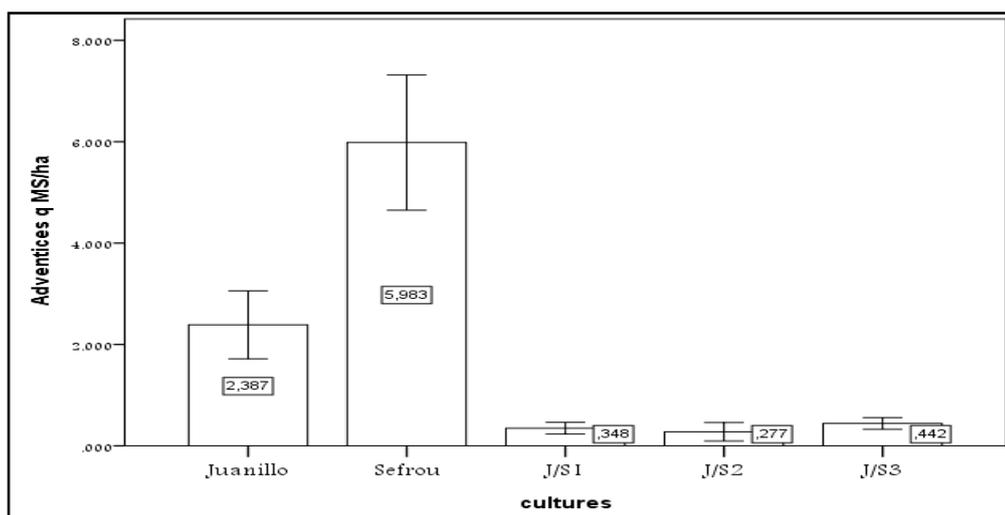


Figure 3 : Biomasse d'adventices mesurée sous des couverts de culture pure et d'association.

## Discussion

L'objectif était d'étudier les effets de la densité de semis sur la croissance et le rendement des associations triticale/pois en zone semi-aride. Nos résultats ont montré que le pois et le triticale cultivés en association produisent, au début du cycle, l'équivalent de la production de leur monoculture ; à partir du stade épiaison/floraison un effet symbiose améliore la production des associations triticale 75-50 et pois 25-50. L'association permet de sécuriser non seulement une production quantitative mais aussi qualitative, par une production de pois, et par conséquent de source azotée, assez rare en régions ne pratiquant actuellement que les cultures céréalières. L'association permet une sécurisation et un équilibre de la ration par rapport à divers facteurs limitants biotiques et abiotiques et garantit une production même si une espèce est pénalisée dans un contexte climatique particulier, lors de phases récurrentes de sécheresse, comme c'était le cas lors de notre expérimentation. Cela s'explique par le fait que cette période coïncide assez souvent avec le stade épiaison/floraison durant lequel le taux de photosynthèse serait plus élevé, afin de pouvoir satisfaire les besoins de la plante en substances élaborées nécessaires au moment de l'initiation florale (Heller, 1995). Par conséquent, il s'instaure entre les plantes se trouvant sous fortes densités une compétition pour la lumière, à l'origine de leur croissance rapide (Dajoz, 1985). La complémentarité des espèces de l'association a pour conséquence de limiter les ressources disponibles pour les autres espèces, comme les adventices, mais aussi de capturer une plus grande quantité et une plus large gamme de ressources que les monocultures, Hauggaard-Nielsen *et al.*, (2006).

Une baisse significative de la matière sèche aérienne est observée lorsque la densité du pois au semis est de 75%. Aussi, une forte réduction de la proportion de pois dans le mélange

impacte négativement cette proportion. Une telle proportion augmente le rendement de la céréale et réduit celle du pois dans le cas de mélange en faveur du triticale (T75-P25). Ainsi, les associations à base de 75 % de triticale et 25 % de légumineuse ont des productions moyennes relativement faibles. De plus, elles sont composées principalement de triticale, ce qui limite la teneur en MAT du fourrage, qui ne dépasse pas 15,5 %. Un tel résultat marquant, d'après Corre-Hellou *et al.*, (2013) donne la possibilité de réduire la densité du triticale de moitié (de 220 gr/m<sup>2</sup> à 110gr/m<sup>2</sup>) sans pénaliser son rendement tout en permettant une légère amélioration de la proportion de pois dans le mélange.

Les résultats de cet essai montrent que les productions fourragères les plus élevées et équilibrées en valeur nutritive sont obtenues avec les associations triticale–pois à des proportions de T50%-V50% ; celle-ci a produit 55.50 q MS/ha de fourrage. Le rendement en grains de l'association triticale 50-pois 50, qui enregistre un LER plus élevé (1.7), confirme la performance de l'association par rapport aux monocultures ; ces résultats sont comparables à ceux de Beji et Khemir (2012) en Tunisie, qui ont étudié une association composée à 50 % de triticale et 50 % de vesce. Par contre, l'association d'une légumineuse, vesce ou bersim, à hauteur de 75% au semis avec le triticale à 25% permet d'augmenter significativement la teneur en MAT du fourrage (Mezni *et al.*, 2000) . Aussi, les travaux de Baghdadi *et al.*, (b2016) sur l'association mais-soja montrent que la combinaison (50:50) est meilleur pour obtenir des bons rendements avec un taux de protéines plus élevée et une bonne qualité de fourrage et ensilage que la monoculture.

Le pourcentage du taux de recouvrement du sol dans les associations est significativement supérieur à celui des cultures pures et est fortement corrélé à la biomasse. Selon Oukinder et Jacquard (1988), le taux de recouvrement du sol est déterminé par l'intensité de la compétition pour la lumière, par la position des feuilles dans les strates du couvert et aussi par la contribution de chaque espèce dans le mélange. D'après Rotili (1979), dans les associations graminées-légumineuses, les situations de compétition avec surcompensation proviennent alternativement d'une espèce ou de l'autre, en fonction de leur précocité ou de leur cycle biologique. Les proportions relatives des deux espèces évoluant dans le même sens a un impact significatif sur la détermination du rendement à la récolte (Oukinder et Jacquard., 1988). Les valeurs moyennes aux stades Epiaison/floraison pour les associations T50-P50 et T25-P75 sont supérieures à celles des cultures pures. Cette performance est d'autant plus importante que le pourcentage de la part du pois est élevé dans le mélange semé. Dans le cas des associations, une densité globale du peuplement plus élevée ainsi qu'une architecture complémentaire entre la céréale et la légumineuse permettent une plus grande interception de

la lumière, donc une fermeture plus rapide du couvert. Des études menées sur des associations pois/maïs et pois/orge montrent que les associations interceptent une part plus importante de rayonnement photosynthétique actif que les cultures pures (Tsubo et Walker, 2004).

Dans l'association T75-P25, le triticales déprime le pois, l'élimination des pieds de pois est due à une compétition entre les deux espèces, résultats de contraintes morphologiques ; l'intensification du tallage rend ainsi le triticales beaucoup plus agressive vis-à-vis du pois semé à une faible densité ; d'après Oukinder et Jacquard (1988) ces relations de compétition seront influencées durant l'établissement par la composition du mélange au semis.

Le taux de recouvrement du sol s'est réduit significativement à la maturité chez les cultures pures. La baisse est plus importante chez le triticales et elle est moindre chez le pois. Cette tendance est due à une part importante de l'humidité du sol qui est perdue par évaporation, exagérant les effets des stress sur la culture et sur le dessèchement des feuilles de base, conduisant à la régression des talles.

L'intérêt de l'association par rapport aux cultures pures est aussi de limiter le développement des adventices ; la décision de composer des mélanges de semis 50 triticales-50 pois montre un effet inhibiteur sur la croissance des adventices. Les travaux de Hauggaard-Nielsen *et al* (2006) ont montré que l'association céréale/légumineuse affecte plus les adventices que les cultures pures, résultat d'une compétition à l'avantage de l'association.

#### **4.Conclusion**

Cette étude nous a permis de produire des résultats répondant à des questions relatives aux inquiétudes des agriculteurs de la région semi aride, soumise à la contrainte hydrique. L'intégration de cultures associées et des densités de semis utilisées pour les mélanges céréale-légumineuses vise à améliorer les rendements des cultures fourragères et l'équilibre de la ration de fourrage produit. L'association Triticales/pois (50-50) a été jugé la plus performante sur les plans qualitatif et quantitatif en fauche au stade épiaison /floraison vis-vis des variable testé (rendement en MS,...). Ce mélange produit un rendement en MS de 56 q/ha dans une région recevant souvent moins de 200 mm de pluies par an. Le foin fauché est de qualité plus équilibrée en azote, et peu être envisagé aussi comme ensilage. Ce mélange produit un gain de 70% plus que la culture pur avec une meilleure couverture du sol pour contrôler les adventices et une meilleure valorisation des ressources du milieu (eau, lumière, éléments fertilisants).

# Estimation de la réflectance (RBG) dans l'association céréale/pois par méthode d'analyse de l'image numérique

Accepté pour publication dans le journal : **Indian Journal of Agricultural Research**  
December 2017

## Résumé :

L'expérimentation est réalisée durant la campagne 2015-2016 à la ferme pilote Sersour, situé à Sétif en zone semi-aride de l'Algérie. L'objectif de cette étude est d'évaluer l'efficacité de l'utilisation de la photographie numérique analytique pour estimer la biomasse et la sénescence par un logiciel software approprié, le Mesurim Pro (Version 3.3). Les résultats montrent des différences significatives entre la réflectance des feuilles dans le spectre lumineux rouge, vert et bleu et la sénescence ; une corrélation positive significative a été enregistrée aussi entre sénescence et réflectance dans le rouge et le bleu ( $r^2=0.78$ ,  $r^2=0.5$  respectivement). La relation entre la sénescence et la réflectance des feuilles expliquée par l'augmentation de la réflectance durant la phase de sénescence traduit une dégradation de la concentration chlorophyllienne des feuilles. Outre nos résultats montrent que l'analyse par photographie numérique peut être adoptée pour estimer la réflectance du couvert végétal et d'autres variations de traits physiologiques.

**Mots clé :** Réflectance, croissance des feuilles, développement des cultures, triticale, orge, pois.

## ABSTRACT

A Field experiment was carried out during the 2015-2016 growing season at Sersour experimental farm, located in the semi-arid region of Sétif (Algeria). The aim of this study was to evaluate the efficiency of using the numerical image analysis approach to estimate biomass and senescence by means of an appropriate software, the Mesurim Pro (Version 3.3). The results showed a significant difference between leaf reflectance at Red, Green and Blue light; results also registered a positive and significant correlation between leaf reflectance at red and blue, and senescence ( $r^2=0.78$ ,  $r^2=0.50$ , respectively). This relationship between senescence and leaf reflectance indicates that the increase in leaf reflectance during senescence stage is due to degradation of leaf chlorophyll content. Overall, the numerical image analysis was a very suitable approach to estimate reflectance of vegetal cover and the variation of some physiological traits.

**key words:** Reflectance, leaf growth, crops development, barley, triticale, pea

## **Introduction :**

les feuilles sont considéré comme interface principale avec l'atmosphère pour le transfert de masse et d'énergie (Rosenberg et al ., 1983). La productivité des cultures dépend de la capacité d'interception des rayonnements incidents par le couvert végétale. La fonction indispensable à la surface foliaire, l'architecture du couvert végétale et l'efficacité de conversion de l'énergie capturée par la plante en biomasse (Campillo, 2010).les feuilles des plantes absorbent facilement la lumière rouge et bleu, l'absorbance est élevée et la réflectance est relativement faible dans cette gamme spectrale (Klein, 1992). Les longueurs d'onde entre 400-700 nm constituent les bandes d'absorption les plus importants de point de vue éco-physiologique, qu'il se rapporte RPA(les radiations photosynthétiques actives). Seulement 50% des rayonnements incidents sont utilisées par la photosynthèse (Valet-Gancher et al ., 1993). Dont il a une grande influence sur les être vivants. Yan(2014) a signalé que la biomasse des cultures devient essentiellement des rendements récoltés. Plus de 90% de dérivé produit par la photosynthèse, et les feuilles sont le principal organe de la photosynthèse.

La lumière bleue à une influence significative sur la photosynthèse des plantes. A l'échelle feuille, la lumière bleue cause des changements dans la composante du bilan énergétique et dans la dynamique de l'échange gazeux par le contrôle des stomates (Jones, 1992) traditionnellement, la méthode prédominante de mesure de la teneur en chlorophylle utilise le spectrophotomètre ; cette méthode a utilisé des tissus végétaux, ce qui coute plus de temps et entraine des dommages aux plantes. La chlorophylle à des pics d'absorbance élevés dans la région rouge et bleu du spectre, la maximum absorbance entre 660 et 680 nm. La spectroscopie de réflectance est largement appliquée pour l'estimation non-destructive de la chlorophylle foliaire (Gitelson et Merzlyak, 1994). Les relations entre la reflectance dans le champ visible et la teneur en chlorophylle des feuilles sont non linéaires (Buschmann and Nagel, 1993). Franklin (2008) a montré que la région spectrale du rouge est fortement corrélée avec la biomasse, c'est pour cela on a choisi de travailler uniquement sur les variations de la réflectance des rayonnements rouge. Les cultures mixte sont connues pour leurs efficacité d'intercepter la lumière (Berntsen et al., 2004 ; Jahansooz et al., 2007) montrent que cette plus grande interception de la lumière provient principalement d'une complémentarité de l'architecture aérienne des deux espèces et d'une densité globale plus élevée en association qu'en culture pure ce qui permet une fermeture rapide du couvert. (Trenbath 1983 ; Tsubo et al., 2001) Les jeunes feuilles sont plus compactes et homogènes que les matures, elles transmettent plus de lumière qu'elles n'en réfléchissent. Elles deviennent

moins homogènes en vieillissant et leur réflectance augmente. Chez la feuille mature, la chlorophylle de couleur verte masque les caroténoïdes de couleur jaune-orange et les anthocyanes de couleur rouge. Durant la sénescence, l'absorption diminue au profit de la réflectance et de la transmittance (Brakke et al., 1989). Récemment, l'imagerie numérique est une nouvelle tendance dans l'analyse des couleurs des plantes. Un appareil photo numérique combiné à un ordinateur et à des logiciels appropriés peut être utilisé pour photographier, numériser et évaluer par l'outil couleur pour des mesures faciles et à un coût abordable (Guendouz, 2012).

L'objectif de cette étude est d'évaluer la biomasse et la sénescence de trois différentes cultures utilisées en association céréale-légumineuses dans la région semi-aride, basé sur la photographie numérique analysée par l'outil Mesurim Pro (Version 3.3) Software

### **Matériels et méthodes :**

L'expérimentation est conduite durant la campagne 2015-2016 dans la ferme pilote Sersour (5°20'E, 36°8'N, 958m). Située dans la région semi-aride inférieure Sud de Sétif, Algérie. Le matériel végétal utilisé l'orge (Fouara), triticale (Juanillo) et pois (Sefrou) en culture seule, cependant les associations comprises (Fouara/Sefrou) et (Juanillo/Sefrou). Ces dernières combinaisons ont été mises en place avec une proportion égale à 50 : 50 pour obtenir une teneur en protéines plus élevée, un meilleur rendement de bonne qualité d'ensilage. Par rapport à la monoculture (Baghdadi et al., 2016)

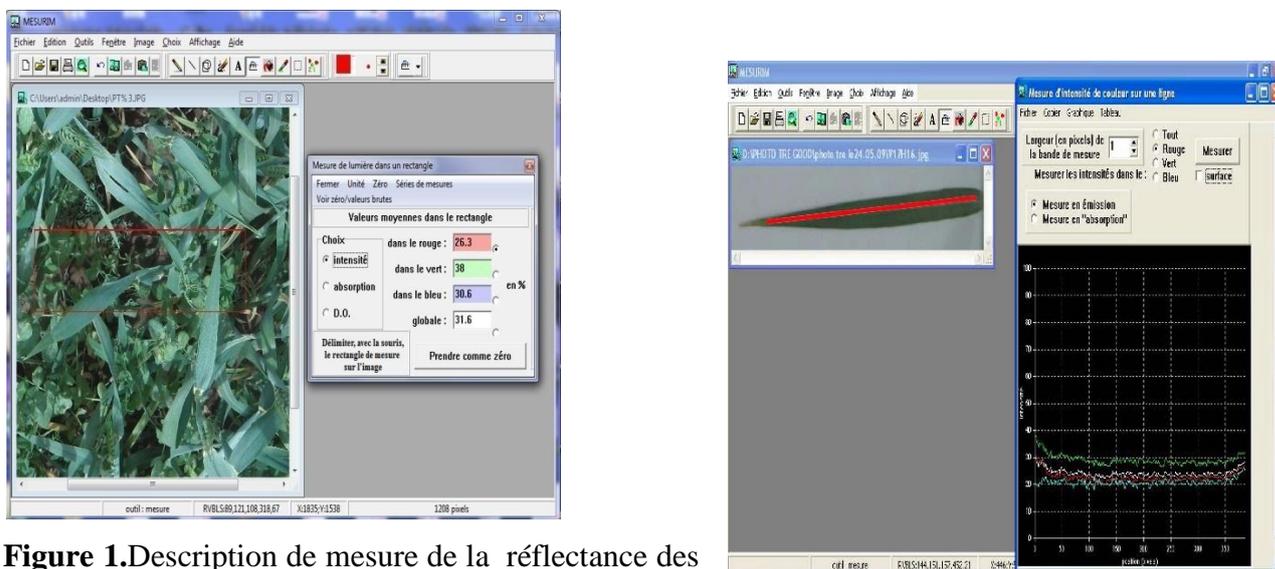
Les feuilles vertes, les tiges et la partie sénescente ont été séparées pour chaque plante, pour déterminer la surface verte et sénescente avec une caméra vidéo portable (Canon, Power Shot A460, AiAF, CHINA). La distance entre la caméra vidéo et la feuille est de 0.3m, par contre entre la caméra et le couvert est de 1m. Plusieurs images ont été prises pour obtenir des variations de feuilles, de cultures et cultures mixtes des différents traitements étudiés. L'image a été stockée dans un JPEG (Joint Photographic Expert Group) avant d'être téléchargée dans un ordinateur PC et analysée en utilisant Mesurim Pro (version 3.3) software qui mesure la surface des feuilles en (cm<sup>2</sup>) et le recouvrement (cm<sup>2</sup>).

<http://www.ac-amiens.fr/pedagogie/svt/info/logiciels/Mesurim2/Telecharge.htm>

Un échantillon a été séché à 80°C pendant 48 heures pour calculer la surface spécifique des feuilles (SSF) : est le rapport entre la surface foliaire et le poids de MS. le ratio GLAI (Green

Leaf Area Index) d'un couvert est le rapport entre la surface foliaire verte multipliée par la biomasse de la placette afin d'estimer le GLAI du couvert

Plusieurs images pour les trois dernières feuilles ont été suivies (F1, F2, F3) analysé par le même software, Mesurim Pro, est utilisé pour identifier la réflectance des feuilles et des couvert aux bandes rouge, verte et bleue.



**Figure 1.**Description de mesure de la réflectance des feuilles et couvert au RGB (Red, Green, Blue) par utilisation du logiciel Mesurim Pro Software.

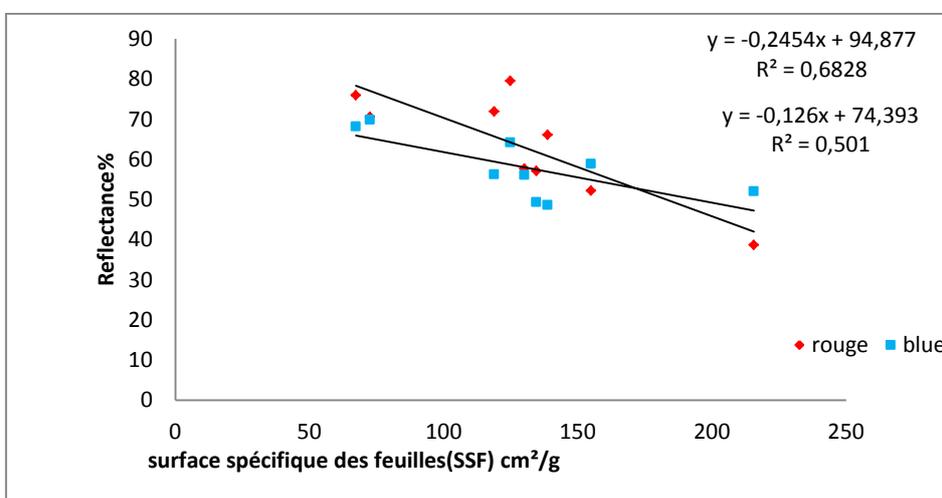
### Résultats et discussion :

**A l'échelle feuille :** dans cette étude de réflectance des espèces céréale-légumineuse dans le rouge, bleu et vert. L'analyse de la variance (tableau.1) relève un effet significatif des espèces en stade de maturation, pas de différence significative entre Fouara et Sefrou dans la réflectance au rouge et au vert par contre dans la réflectance du bleu il y a des différences significatives entre eux. L'analyse d'ANOVA de la sénescence montre des différences significatives entre Faouara et Juanillo ( $S\%=49.62$  et  $S\%=14.3$ , respectivement). L'étude des corrélations montre une association négative entre la réflectance rouge et bleu et la surface spécifique des feuilles ( $r^2=0.68$  et  $r^2=0.50$  respectivement)(figure.2). ainsi que la sénescence est corrélaté positivement et significativement avec SSF dans la réflectance au rouge et au bleu ( $r^2=0.78$ ,  $r^2=0.29$ , respectivement)(figure.3). Les changements dans la réflectance des feuilles vertes avec maturation et sénescence ont été attribués aux changements dans la chlorophylle et l'arrangement de la mésophylle (Grant, 1987) les variations de la teneur des feuilles en chlorophylle sont détectables.

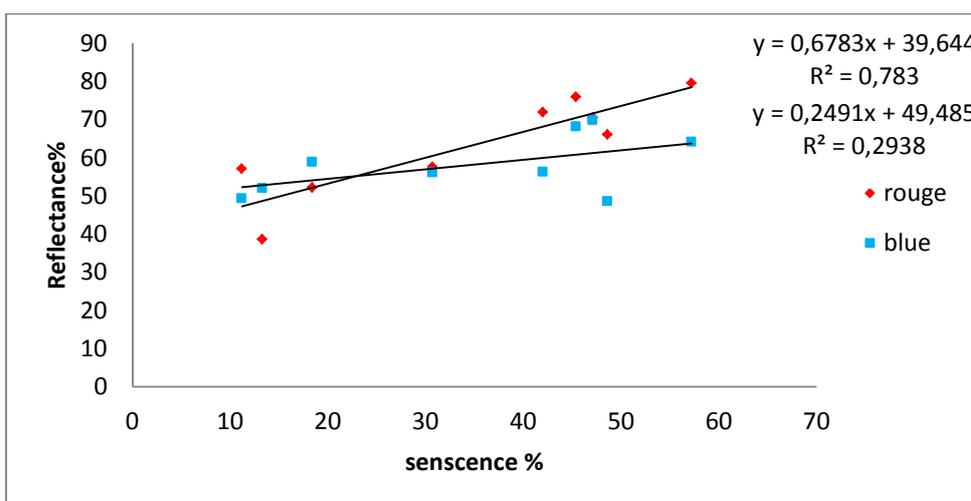
Tableau 1. Analyse de la variance (ANOVA) de la réflectance et la surface spécifique et senescence des variétés cultivées Fouara, Juanillo and Sefrou.

variétés	Reflectance RGB %			Surface spécifique des feuilles (SSF)cm <sup>2</sup> /g	Senescence %
	Rouge	Verte	Bleu		
Fouara F	53.59a	66.77a	55.38b	167.33ab	49.62a
Juanillo J	43.35b	57.39b	52.33b	150.49b	14.3b
Sefrou S	51.72a	67.82a	62.44a	178.22a	41.06ab
LSD <sub>5%</sub>	7.23	6.65	6.62	27.32	9.47
variétés	*	**	*	ns	***
Stades	***	***	***	***	/

\* =  $\leq 0.05$     \*\* =  $\leq 0.01$     \*\*\* =  $\leq 0.001$     ns = not significatif



**Figure 2.** Linière de regression de la réflectance et Surface spécifique des feuilles



**Figure 3.** Linière de regression de la réflectance et senescence des feuilles.

**A l'échelle culture:** les valeurs moyennes de la réflectance au rouge variaient de 33 pour Juanillo/Sefrou à 38.1 pour Sefrou pur (Tableau.2). L'estimation de la réflectance au rouge n'a pas montré de différence significative entre les cultures. Ainsi il y a des différences significatives au vert et au bleu parmi culture/association étudiées. A la réflectance verte regroupe Faouara, Sefrou, Faouara/Sefrou et Juanillo/Sefrou dans le même groupe. Et leurs valeurs varient entre 42.74 et 46.76%, les valeurs les plus élevées de la réflectance au bleu enregistré dans Sefrou pur. Les résultats de l'ANOVA montrent des différences significatives entre culture et taux de recouvrement (Tableau.2) les valeurs les plus élevées sont enregistrées par Faouara, Faouara/Sefrou et Juanillo/Sefrou. L'index (GLAI) surface de la feuille verte, pour le pois cultivé seul est de (2.84) il est inférieur à celui des céréales en culture pure. GLAI des associations est plus élevé que celui des cultures pures correspondantes. GLAI de l'association Juanillo/Sefrou et de Juanillo pur est supérieur à l'association Faouara/Sefrou et Faouara pur. Baghdadi et al (2016) rapportés que les systèmes de cultures associées améliorent l'efficacité de l'utilisation des terres et de l'intensité que les systèmes de culture pures. Cette étude montre des corrélations négative la réflectance au rouge et au bleu et l'index GLAI. (Trebath, 1983 ; Tsubo et al., 2001) la compétitive d'une espèce donnée pour l'absorption des rayonnements solaire et par conséquent son poids sec et son rendement de son indice de surface de la feuille verte GLAI, L'architecture foliaire, la hauteur et la durée du cycle, par rapport culture pure (Fukai, 1993 ; Midmore, 1993)

**Tableau 2.** Analyse de la variance (ANOVA) de la réflectance RGB, et le recouvrement (RC) et GLAI en associations et cultures pures.

Cultivas	Reflectance RGB %			RC%	GLAI
	Rouge	Verte	Bleu		
Fouara	35.28ab	41.18b	33.75c	57.18a	6.36a
Juanillo	36.7ab	46.76a	39.9a	51.94b	7.69a
Sefrou	38.1a	43.34b	40.08a	43.4c	2.84b
Fouara/Sefrou	35.5ab	42.74b	36.25b	54.28ab	6.70a
Juanillo/Sefrou	33b	42.81b	37.83ab	53.27ab	8.14a
LSD <sub>5%</sub>	3.16	2.9	2.45	4.19	2.27
Cultivas	ns	**	***	***	**
Stage	***	***	***	***	***

\* = ≤ 0.05      \*\* = ≤ 0.01      \*\*\* = ≤ 0.001      ns = not significatif

## **Conclusions :**

A l'échelle feuille, la réflectance au rouge et au vert pour Faouara et Sefrou ne montrent pas des différences significatives, mais au bleu, il y a des différences significatives entre eux. La sénescence est corrélée positivement et significativement la réflectance foliaire au rouge et au bleu. ( $r^2=0.78, r^2=0.50$ , respectivement). La SSF est corrélée significativement au réflectance au rouge et au bleu. ( $r^2 =0.78, r^2=0.29$ , respectivement) cela explique par les variations de la teneur en chlorophylle détectables par la réflectance spectrale, se sont révélées être liées au développement des feuilles et à la sénescence. A l'échelle culture les moyennes de réflectances au rouge varient entre 33% pour Juanillo/Sefrou et 38.1% pour Sefrou. La réflectance au bleu la plus élevée chez la culture pure Sefrou (40.08%). Les résultats d'analyse ANOVA montrent des différences significatives entre les cultures et taux de recouvrement et l'index GLAI. La meilleure valeur enregistrée chez Faouara et Faouara/ Sefrou et Juanillo/Sefrou. Enfin, le résultat de cette étude a prouvé l'efficacité de l'utilisation de l'analyse d'image numérique pour estimer la réflectance des feuilles et cultures aux bandes rouge, bleu et vert.

# Effacité de la symbiose *Rhizobium*-légumineuse et son impact sur le fonctionnement des associations céréales/légumineuses

Soumit à publication dans le journal : *ARP Journal of Agricultural and Biological Science*

## Résumé

La symbiose *Rhizobium*-légumineuses conduit à la formation des nodules racinaires fixateurs d'azote atmosphérique. Ce processus naturel présente un intérêt économique et agronomique considérable. Notre étude concerne la collecte de nodosités racinaires, qui sont prélevées sur le pois fourrager (*Pisum sativum* L.) en culture pure et en cultures mixtes avec le triticale, l'orge et l'avoine, cultivés selon deux types de semis: Le semis direct et le semis conventionnel. L'étude a été réalisée en situation semi-aride de l'est algérien, où la pluviométrie était inférieure à 300mm/an. L'objectif principal de ce travail était de déterminer le niveau de variabilité nodulante de *Rhizobium* selon le type de semis, le type de culture, la réponse de croissance de la plante hôte et de la plante associée. Les résultats montrent des différences significatives de l'association triticale-pois fourrager et l'intensité de la nodulation en semis direct, qui était de (21.66 nodule/plant), favorisant l'élongation des tiges. Aussi, le nombre de nodules a permis une augmentation de la hauteur des tiges en culture mixte triticale/pois en semis direct : 30.83 cm pour le triticale et 14.5 cm pour le pois. Une corrélation significative positive entre l'élaboration de la biomasse aérienne et la densité de nodosité ( $r^2 = 0.86$ ) a été observée. Le nombre de nodule favorise la culture mixte par rapport à celle cultivée seule par le biais de l'effet de l'azote symbiotique et l'interaction interspécifique racinaire bénéfique des plantes associées.

**Mots clés :** Nodosité, *Rhizobium*, associations, semis direct, pois, triticale, orge, avoine.

## Abstract:

The rhizobium-legumes symbiosis leads to the formation of root nodules fixing atmospheric nitrogen. This natural process has a considerable economic and agronomic interest. The root nodules are collected on the forage pea (*Pisum sativum* L.) cultivated in the field on single and mixed crops with the triticale, barley and oats. Two types of seedling are adopted: direct seedling and conventional in rainfall conditions less than 300mm/year, in semi-arid area of East Algeria. The main goal of this study was to determine the level of nodulating variability of *Rhizobium* in type of seedling, in type of crop, response of the host plant and associated plant. The results showed significant differences between triticale-pea intercropping and

nodular intensity in direct seedling (21.66 nodule/ plante) of stem elongation and improvement of aerial biomass. Also, the number of nodules allowed an increase in the height of the stems in intercrops Triticale/Pea in direct sowing: 30.83 for tritical and 14.5 cm for pea. A significant correlation ( $r^2=0.86$ ) between the density of nodules and the elaboration of the dry matter favors the mixed crop compared to that cultivated alone through the effect of symbiotic nitrogen and beneficial root inter-specific interaction of associated plants.

**Keywords:** Node, *Rhizobium*, inter-crops, direct seeding, pea, triticale, barley, oats.

## Introduction

Dans les associations céréale-légumineuse, la complémentarité dans l'utilisation de l'azote appartenant à deux niches (azote minéral du sol et l'azote atmosphérique) apparaît comme un élément majeur de leur performance relativement aux cultures pures. Cette complémentarité expliquerait en effet le gain de rendement observé dans ce type d'association et en particulier dans les systèmes à faible niveau d'azote (Hauggaard-Nielsen *et al.*, 2009 ; Bedoussac et Justes, 2010 ; Naudin *et al.*, 2010). La céréale est très compétitive pour l'azote minéral du sol et son développement souvent précoce contribue à épuiser rapidement la quantité d'azote minéral présente dans l'horizon superficiel du sol, or, un épuisement rapide de l'azote du sol par la céréale en association active la formation et l'activité des nodules des légumineuses (Liu *et al.*, 2011). Selon Danso (1995), l'azote de la fixation symbiotique a une contribution plus importante pour la croissance des plantes par rapport à celui des engrais azotés appliqués dans l'agriculture des pays en développement. L'azote de l'atmosphère fixé dans les nodules contribue pour 50 à 60 % de l'azote des légumineuses à graines, 55 à 60 % de l'azote des arbres fixateurs d'azote, 70 à 80 % de l'azote des légumineuses fourragères. De ce fait, la légumineuse assure ses besoins azotés par une augmentation de la fixation symbiotique d'azote atmosphérique. Les modifications abiotiques et biotiques de l'environnement des microorganismes affectent également la structure des communautés microbiennes du sol (Andrade *et al.*, 2003). D'autre part, les différences morphologiques et physiologiques des systèmes racinaires des espèces associées joueraient un rôle important dans la compétition pour l'azote et les autres minéraux du sol (Berendse, 1979 ; Cahill, 2002). Les agriculteurs biologiques, qui n'utilisent pas l'azote de synthèse recourent très souvent à ces associations (Seutin *et al.*, 2011). L'interaction entre les espèces peut intervenir au niveau racinaire directement, ou par le biais des communautés microbiennes du sol. La mise en place des nodosités et de leur activité se fait progressivement chez les légumineuses (Voisin *et al.*, 2002). Le pois fourrager a prouvé ses capacités d'adaptation et de production au niveau de

toutes les zones du nord de l'Algérie. Cette espèce qui a connu un développement conséquent dans les années 80 a connu par la suite un net recul en matière d'utilisation, malgré la sélection par l'Institut Technique des Grandes Cultures (ITGC) de variétés productives. Les expérimentations menées à l'ITGC ont démontré que l'association à base de pois fourrager (Pois-avoine, pois-triticales, pois-orge) est plus équilibrée que celle à base de vesce car cette dernière est souvent étouffée par la céréale utilisée (FAO, 2006). L'objectif de notre étude est d'analyser la variabilité nodulante de la symbiose rhizobium-légumineuses vis-à-vis du travail du sol et le rendement en biomasse aérienne ; notre travail vise à comprendre l'effet des différentes combinaisons d'association céréale-légumineuse choisies selon leur adaptation aux régions semi-arides pour sélectionner la céréale qui profite mieux de la symbiose Rhizobium-pois fourrager (*Pisum sativum subsp. arvense* L.),

## **2. Matériels et Méthodes**

### **2.1. Présentation de la région d'étude**

L'expérimentation a été conduite sur le sol de la ferme de démonstration Salah Sersour, située à 35 km au sud de Sétif-ville (35°56' N, 05°32' E, 920 m). Le sol est argilo-limono-sableux, de pH 8.2, avec 20% d'argile, 32% de limon et 48% de sable, mais limité en profondeur, à 50 cm, par une dalle calcaire. Le site expérimental appartient à l'étage bioclimatique semi-aride inférieur, dont le climat se caractérise par une pluviométrie moyenne de 250 mm, un hiver froid, un gel printanier fréquent et l'avènement de la sécheresse associé à l'élévation de la température de l'air ambiant et au sirocco, vent chaud et desséchant, soufflant du sud, dès le mois de mai (Kribaa *et al.*, 2001).

### **2.2. Matériel végétal**

L'étude a été effectuée sur des espèces céréalières et légumineuses. Les associations culturales et leur culture pure retenues sont le Pois/Triticale, Pois/Orge et Pois/Avoine, la variété du triticales (X Triticosecale Wittmack) Juanillo, la variété de pois fourrager (*Pisum sativum* L.) Séfrou, la variété d'orge (*Hordeum vulgare* L.) Faouara et la variété d'avoine (*Avena sativa* L.) Avon. Ces variétés ont été choisies sur la base de leur adaptation au milieu où elles ont été sélectionnées et actuellement multipliées par la station de production de semences de l'Institut Technique des Grandes Cultures (ITGC) d'El Khroub (Zaghouane et Boufenar, 2002).

### **2.3. Dispositif Expérimental**

Les traitements étudiés sont constitués de trois associations triticale/pois, Orge/Pois, Avoine/pois semées à des doses de 50kg de semences par hectare pour la céréale et 100 kg/ha pour la légumineuse et pois cultivé seul (témoin) avec une densité de semis de 200 kg de semence par hectare. Les mêmes traitements ont été cultivés en semis direct (SD) et en semis conventionnel (SC) dans un dispositif expérimental en split plot ; c'est un dispositif aléatoire en blocs avec quatre répétitions. Le semis a été réalisé au mois de novembre 2016 sur des parcelles élémentaires de 3m de long par 10 m de large avec un espace inter-rangs de 0.17 m, soit une surface de 30 m<sup>2</sup> par parcelle élémentaire. Le semis a été effectué en mélangeant les semences des deux espèces dans la cuve du semoir. L'expérimentation a reçu, juste avant le semis, 1q/ha d'engrais phosphatés sous forme de Mono-Ammonium Phosphate (MAP) dosant 26.93% de P et 12.18% de N<sub>2</sub>. A la fin de l'hiver, au démarrage de la végétation, 60 kg/ha d'engrais azotés, Azosul, à 34% de N<sub>2</sub>, ont été apportés à tous les traitements à l'exception du pois pur.

### **2.4. Mesures effectuées**

La collecte des nodules a été réalisée à partir des racines de la plante du pois fourrager à la floraison selon les techniques préconisées par Vincent (1970). Il s'agit de creuser environ 15 cm autour de la plante et 20cm dans le sol pour extraire la plante et son appareil racinaire. Manuellement, on sépare la terre au niveau des racines sans toutefois endommager les nodules. Les racines avec leurs nodules sont lavées délicatement des restes de terre à l'eau de robinet. Un dénombrement (NN : nombre de nodules) puis les nodosités ont été désinfectées en surface dans une solution d'hypochlorite de calcium (3%) pendant 3 min. Après 7 rinçages de 1 min chacun dans de l'eau distillée stérile, les nodules seront écraser avec une pincée stérile puis étaler sur un milieu contenant du rouge Congo colorant organique.

Des observations macroscopiques et microscopiques sont réalisées pour repérer la présence de la bactérie sur les racines du pois fourrager. Pour la partie aérienne, les paramètres mesurés concernent la longueur des tiges et la matière sèche après séchage pendant 48 heures à 85°C.

## **2. Résultats**

D'après nos résultats, sur la coupe histologique d'une nodosité de pois, la première constatation macroscopique est que l'intérieur du nodule est rouge constituées d'hémoglobine végétale très proche de l'hémoglobine humaine. La structure du nodule est granulaire (figure 1) dans la zone périphérique mais devient franchement anarchique en son centre.

La couleur rouge est une indication de l'activité symbiotique de la fixation de l'azote atmosphérique par la présence de la souche bactérienne. Oke et long (1999) montrent que le tissu central du nodule, qui est bien alimenté en sève caractérisé par la présence de la leghémoglobine (LegHb) (dérivant de la légumineuse et de l'hémoglobine), constitue l'hémoprotéine fixatrice de dioxygène (O<sub>2</sub>) nécessaire pour la fixation d'azote, caractérisation des rhizobiums.

La bactérie de la souche symbiotique (Figure 2) du genre *Rhizobium* (*Rhizobium leguminosarum*) correspond à l'identification de Riah (2014) sur les racines du pois fourrager cultivé à l'étage semi-aride de l'Est algérien ; son identification est basée sur l'analyse phylogénétique. D'après ces caractéristiques morphologiques, les souches se sont montrées en accord avec la description décrite par Jordan (1984) et Vincent (1970) pour le *Rhizobium* à croissance rapide. Elle fait partie de la tribu des Rhizobiaceae qui sont membres de la famille des Protobacteria, Ordre des Bactériales et Sous-Embranchement des Eubacteria.



Figure.1. Les nodules, observables sur le système racinaire de pois fourrager



Figure 2.Observation microscopique optique(X1000 Immersion) la bacterie de genre *Rhizobium* sur nodule racinaire de pois fourrager.

### **3.2. Importance de la nodulation**

Le nombre de nodules produit est très variable entre les différentes variétés analysées. Une diversité de réponse de nodulation commence à ressortir à la floraison du pois. D'après Alkama (2009), ce stade physiologique correspond en effet généralement au développement maximal nodulaire.

Au début du cycle, le nombre de nodules produit par plante est de 6.5 nodules en moyenne sur les racines de la plante hôte, suit une tendance à l'augmentation à 21.66 nodules en moyenne puis une diminution en fin de cycle. Le nombre de nodules est très sensible aux températures élevées. La plage de température optimale de croissance de la plupart des rhizobiums est de 28 à 31°C ; nombreuses souches sont incapables de croître à partir de 37°C. (Drouin *et al.*, 1996). Les hautes températures (> 30°C le jour et > 20°C la nuit) entraînent une réduction de rendement chez le haricot à cause d'une transpiration excessive de la plante (Rainey et Griffiths, 2005). La comparaison visuelle de l'aspect des nodules révèle une diminution de la taille et voire même une coloration blanchâtre des nodules. Cette couleur témoigne de la diminution de l'efficacité de fixation de l'azote au niveau des nodules.

### **3.3. Paramètres affectant la nodulation**

#### **3.3.1. Effet sur la levée**

Le paramètre nombre de nodosités (NN) (tableau 1) n'affecte pas la levée, cela est expliqué par l'absence de la symbiose fixatrice de l'azote atmosphérique en début du cycle végétatif. Les premiers nodules apparaissent après 3-4 semaines de la levée, leur formation est visible et de couleur roses-rouges, le pois est au stade 3-4 feuilles. Leur mise en place a lieu au détriment des racines. Les reliquats azotés minéraux du sol au semis favorisent le démarrage de la croissance, permettant une disponibilité en nutriments carbonés et azotés suffisante au sein de la plante, pour une mise en place rapide des nodosités (Voisin., 2013).

Les pertes entre culture pure et mixte liées à la dose de semis, sont moins importantes au sol en semis conventionnel qu'en semis direct, les variations sont dues probablement à la qualité de semence (Faculté germinative) et à la capacité d'adaptation de chaque espèce aux conditions agro-écologiques de l'environnement de production.

#### **3.3.2. Effet de travail du sol**

L'ANOVA montre des différences significatives ( $P < 0.05$ ) du nombre des nodules (NN) entre le semis direct (SD) et le semis conventionnel (SC). Le SD améliore la croissance des

plantes et des nodules en comparaison avec celle du SC. le NN est particulièrement sensible aux perturbations environnementales telles que les pratiques agricoles, la matière organique et la contamination des sols par des métaux lourds (Palmer et Young., 2000). Le système agricole conventionnel diminue la teneur en matière organique et en phosphore soluble dans les premiers horizons par rapport au sol du semis direct (Ardenghi.,1989), le semis direct offre une activité biologique plus intense, le travail du sol a également une influence sur les populations microbiennes (Cookson *et al.*, 2008). Tous les facteurs de l'environnement qui modifient la croissance de la plante ont un effet indirect sur le niveau de fixation symbiotique. La symbiose rhizobienne s'exprime beaucoup mieux et l'azote fixé est plus élevé qu'en situation de travail conventionnel. Les légumineuses font partie intégrante des rotations dans les grands pays du SD: le soja en Amérique (Nord et Sud) et le lupin en Australie. De ce fait, les agriculteurs de ces pays n'ont pas connu de problèmes de faim d'azote liés au non-travail du sol. Angar *et al.* (2010) ont montré que le SD est une technique, qui, avec l'accumulation des résidus au fil des années augmente le taux de la matière organique en SD dans tous les horizons du sol, la MO s'améliore après cinq cycles de cultures dans les horizons du sol allant jusqu'à 40 cm, y compris le niveau des 10 et 20 cm là où se concentre la majorité de la biomasse racinaire engendrée par l'amélioration du rendement

### **3.3.3. Effet culture mixte**

Des différences significatives pour le paramètre NN entre culture pure et mixte ont été observés, il est meilleur en culture mixte avec le triticale et orge en SD par rapport au pois pur, tandis que l'effet culture mixte est moins important en SC (tableau.1). Nous notons qu'en culture mixte, la nodulation s'est significativement améliorée chez le triticale ce qui s'accorde avec les résultats de Mei *et al.* (2012) qui ont montré que la fève nodule mieux en culture mixte avec le maïs qu'en culture seule. Hauggaard-Nielsen *et al.*,(2009) ont signalé que, lorsqu'on compare la culture intercalaire de la fève ou du pois avec les cultivars d'orge sur deux types de sols, la fève était un meilleur choix que le pois, en raison d'une meilleure complémentarité spatiale ou temporelle avec l'orge. Généralement, le rendement en grains d'une culture mixte de la fève et des céréales sans engrais azotés était semblable au rendement en grain des céréales en culture unique fertilisée avec une quantité optimale de l'azote, mais le taux des protéines totales a été significativement plus élevé, à cause du contenu de la fève dans le grain mélangé (Jensen and Hauggaard-Nielsen, 2003 ; Hauggaard-Nielsen *et al.*, 2009). Cette interaction positive a été signalée par Callaway, (1995)

qui a expliqué que cette complémentarité peut être définie comme une diminution de la concurrence par le biais de partitionnement des ressources entre les espèces associées. C'est une interaction positive par laquelle une espèce augmente la croissance, la reproduction et/ou la survie des espèces associées par le biais des mécanismes de facilitation qui consistent à modifier l'environnement biotique ou abiotique, entraînant finalement la disponibilité accrue des ressources (Betencourt *et al.*, 2012). En effet ces auteurs ont montré qu'au niveau des sols rhizosphériques, la disponibilité du P augmente pour les deux espèces intercalées légumineuse-céréales et spécialement dans des sols à faible teneur en P et que cette augmentation est associée à des changements des pH.

Tableau1: Résultat de l'ANOVA (P. 0.05) des paramètres de la levée, hauteur des tiges et nombre de nodosités en association Orge/Pois (O/P), Triticale/Pois (T/P) et Avoine/Pois (A/P) en pois pur, en semis direct (SD) et en semis conventionnel (SC). (P) pois, (C) céréales

cultures	Nombre de pois levée/m <sup>2</sup>				Hauteur des tiges (HT)				Nombre de nodosités (NN)	
	SC		SD		SC		SD		SC	SD
	P	C	P	C	P	C	P	C		
O/P	21abcd	28.66b	15cd	38ab	10.33 bc	14.33d	13ab	20c	10.33b	15.33a b
T/P	31.33 ab	43a	13.33d	40.66 ab	12.33 ab	27.66 ab	14.5a	30.83a	11b	21.66a
A/P	28.66 abc	38.33 ab	18.66 bcd	28.66b	6.16c	23.66 bc	12ab	20.33c	7.33bc	10.66a b
P	34.66a	-	22abc d	-	7c	-	10bc	-	9.33bc	10.33b
LSD %5	15.08	14.53	15.08	14.53	9.62	6.77	9.62	6.77	3.16	3.16
P=	ns	ns	ns	ns	**	***	**	***	*	*

\* = ≤ 0.05      \*\* = ≤ 0.01      ns = not significatif

### 3.3.4. Effet sur la croissance aérienne des plantes : (Elongation des tiges et rendement en matière sèche)

Le paramètre longueur des tiges a été significativement influencé par le NN (Tableau. 1), l'ANOVA a montré une différence significative (P< 0.05) des hauteurs de la tige ; la valeur la plus élevée (14.5 cm) est notée chez le pois en culture mixte avec le triticale en sol SD dont le NN était le plus élevé. Ainsi on observe une amélioration des hauteurs des tiges des plantes associées, du triticale et de l'orge dont le NN est élevé, cependant cette relation est inversée pour l'avoine. La hauteur de la végétation est une importante caractéristique "variétale" qui, sous conditions semi-arides, devient un déterminant du rendement en grain (Bouzerara et Ould Ferroukh, 2010).

L'élongation des tiges est faible en semis conventionnelle favorisant le semis direct à l'exception de l'avoine qui favorise SC. Le fait que les tiges des céréales sont plus élevées que celle du pois, cela rend la céréale plus compétitive vis-à-vis l'absorption de l'énergie lumineuse, les pois ombragés ont manifesté une morphologie typique avec une hauteur plus grande par rapport au pois pur. Oukinder et jacquard, (1986) a montré l'effet du composant avoine sur les états de croissance et de développement des vesces associées (déformations plastiques).

D'après la (figure 4), qui représente la variation de la partie aérienne chez l'ensemble des traitements étudiés selon le nombre de nodosités, cette dernière montre une corrélation significative positive ( $r^2=0.86$ ). Une relation positive de la quantité de matière sèche a été observé avec le NN. La plus importante augmentation est notée chez la culture mixte avec le triticale (24.99 q/ha) correspondant à 21.66 nodules sur les racines du pois. Ainsi les rendements en MS des cultures mixtes sont supérieurs à ceux des espèces cultivées seules. D'après Corre-Hellou *et al.*, (2006), la proportion d'azote contenu dans les parties aériennes de la culture à la récolte, issu de la fixation, est systématiquement plus élevée dans une légumineuse associée que dans une culture mono spécifique de légumineuse.

Nous avons constaté que les variétés qui ont plus de nodosités, produisent plus de matière sèche. Ce facteur de variabilité affecte l'efficacité d'assimilation de l'azote dans le sol. Nos résultats sont similaires à ceux rapporté par Mouafek (2010). Dans le cas de la luzerne, les analyses de corrélation indiquent que chez la variété Dista, la biomasse sèche aérienne et la biomasse sèche nodulaire sont reliées entre eux ( $r^2= 97.3$ ), aussi chez la population Baldia, les deux paramètres sont corrélés positivement entre eux ( $r^2= 97.2$ ). Rupela et Dart (1980), ont montré l'existence d'une corrélation significative entre l'accroissement du poids de matière sèche des parties aériennes et le nombre ou le poids sec des nodosités. Des résultats similaire pour d'autre variétés de legumineuses ont été rapportés; Aouani *et al.*,(2003) trouvent une corrélation significative entre le nombre de nodules et la croissance végétale chez le pois chiche (*Cicer arietinum*). Drevon *et al.*,(2003) Aussi montre une corrélation significative entre la croissance du haricot et sa nodulation. Palmer et Young., 2000 observent que la réduction du nombre de nodules de rhizobiums nodulant chez le pois chiche affecte la biomasse aérienne. Martin *et al.*, (1982) ont montré que la culture mixte avec la fève cause une augmentation de 50% de biomasse aérienne de l'orge. (Remison et Snaydon 1980).

Un bon rendement végétatif en conditions symbiotiques favorise la fourniture d'azote, il réduit généralement la compétitivité de la légumineuse vis-à-vis de l'absorption de l'azote

dans le sol ; plus la quantité d'azote minéral est élevée, plus la céréale en bénéficie et se développe, au détriment de la légumineuse, moins compétitive (Corre-Hellou *et al.*, 2006), ce qui conduit à une proportion de céréale plus importante dans la récolte. (Thomsen et Hauggaard-Nielsen, 2008 ; Pelzer *et al.*, 2012).

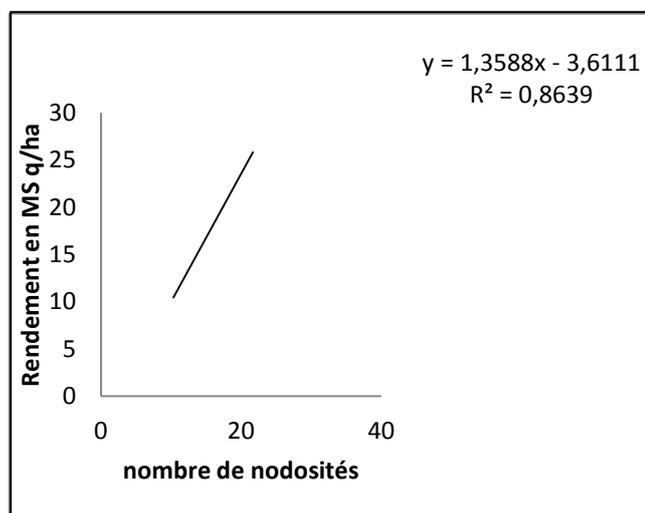


Figure 4. Corrélation entre la croissance de la biomasse aérienne sèche des traitements étudiés en fonction de la croissance du nombre de nodosités (NN).

#### 4. Conclusion

Notre étude a permis d'évaluer la variabilité des nodosités issues de la symbiose Rhizobium-pois fourrager. Les paramètres de milieu de la région d'étude présente des propriétés favorables pour la vie microbienne et la fixation symbiotique. Le nombre, la couleur ainsi que la forme des nodules sont autant des facteurs actifs indiqués par la sécrétion d'une substance "leghémoglobine" qui confirme la présence de l'activité fixatrice d'azote par la bactérie *Rhizobium leguminosarum* au sein des tissus meristématiques centrales de la nodosité. Les nodosités sont globulaires, leur développement est maximal à la floraison de la plante hôte, et atteint 21.66 nodules en moyennes sur les racines du pois en culture mixte avec le triticales. Il n'y a pas un effet significatif de nodulation sur la levée de la plante hôte. Cependant des différences significatives sont observées plus tard sur l'élongation des tiges, un nombre élevé de nodule augmente la hauteur des tiges en culture mixte triticales/pois (30.83-14.5 cm respectivement triticales, pois); une corrélation significative positive entre l'élaboration de la matière sèche et le nombre de nodule ( $r^2=0.86$ ) a été observé. L'intensité de la nodulation est affectée par le type de semis en faveur du semis direct et le mode de culture mixte dont l'association la plus performante vis-à-vis du nombre de nodosités est celle

de triticale-pois. Enfin, la fixation symbiotique d'azote représente une alternative importante à la fertilisation azotée minérale surtout dans une région semi-aride. De ce fait, il semble très intéressant d'exploiter ce processus et le généraliser pour améliorer la fertilité des sols. Ayant une importance économique et écologique considérable, la généralisation de cette alternative semble très bénéfique pour le développement de l'agriculture et pour cela il faut approfondir l'étude des interactions rhizosphériques entre les légumineuses et céréales en culture mixte.

## Conclusion et perspectives

En Algérie, les légumineuses ont été peu utilisées dans la production fourragère malgré leur diversité. Les travaux présentés dans cette étude concernent l'insertion d'une légumineuse en association avec une plante commerciale céréalière, avec une approche fondée sur l'expérimentation. L'objectif était d'affiner la compréhension du fonctionnement de ces systèmes de culture innovants en milieu semi-aride et de tester des stratégies de conduites de la légumineuse afin d'optimiser la conduite de ce système et de proposer des améliorations de la production des associations fourragères en Algérie, en régions sous contraintes environnementales et climatiques.

Cette étude a été réalisée sur une échelle de temps pluriannuelle. Les résultats issus de ces travaux permettent de valider la première hypothèse qui reposait sur le fait que l'insertion de légumineuse en cultures modifie l'accès des plantes aux ressources du milieu et la croissance des peuplements dans le système de culture mixte céréale-légumineuses, ce qui a impacté le rendement en biomasse.

Les premiers résultats de l'expérimentation mettent en évidence la sensibilité du système aux aléas climatiques intervenus entre les trois années d'expérimentation et les conséquences sur les rendements en biomasse aérienne des associations étudiées céréale-pois. L'étude a permis d'identifier les périodes sensibles durant lesquelles s'exerçait la compétition entre les plantes associées; Il a été démontré que le cumul de précipitation est un facteur limitant pour le fonctionnement et la productivité des associations fourragères, les effets peuvent avoir lieu dès les premiers stades de croissance des plantes associées lors de la mise en place de la composante « nombre de talles », le rythme de croissance de la légumineuse est très faible en début du cycle de croissance, L'absence de la pluviométrie jumelée aux hautes températures durant la période de fin cycle du fourrage, induisaient un raccourcissement de la durée des phases consécutives du cycle de la culture ; cette dernière affecte peu le rendement de la céréale engendrant ainsi une diminution significative du rendement en biomasse des associations (cas des associations orge-pois et triticales-pois)

Cette étude montre l'efficacité d'adaptation du couple pois - triticales aux conditions de déficit hydrique qu'en culture mixte avec l'orge. L'orge performe mieux en culture pure qu'associée avec le pois.

Nos résultats portaient aussi sur la performance des mélanges triticales-pois comparativement aux cultures pures. Nos résultats confirment le fait que les associations sont globalement plus productives que les cultures pures dans des conditions climatiques du sud- Est de Sétif. Ce système permet d'augmenter la production de biomasse (53.07q/ha) en association par rapport

à une culture seule, réalisant un gain de productivité de 11%, et améliorant la qualité du fourrage obtenu.

L'intégration de cultures associées et des densités de semis utilisées pour les mélanges céréale-légumineuses vise à améliorer les rendements des cultures fourragères et l'équilibre de la ration de fourrage produit. L'association Triticale/pois (50-50) dans le a été jugé la plus performante sur les plans qualitatif et quantitatif en fauche vis-vis des variable testées (rendement en MS, taux de recouvrement, rapport feuilles sur tige...). Nos résultats ont confirmé que la céréale se caractérise par une croissance relativement plus précoce que les légumineuses pour lesquelles la biomasse augmente principalement après la floraison. En effet, ces dernières consacrent la période avant leur floraison à l'accroissement de leur surface foliaire alors qu'après la floraison l'accroissement de biomasse correspond à la mise en place des organes fructifères, puis se prolonge jusqu'à la fin du remplissage des grains. Ce mélange produit un rendement en MS de 56 q/ha avec un taux de recouvrement entre 53%-65% qui intègre l'architecture de la céréale couplé à une légumineuse et leurs interactions, ainsi que la plasticité de la morphogénèse aérienne, qui ensemble produisent la dynamique de croissance foliaire aérienne et améliore l'absorption de rayonnement par les deux espèces, ce qui permet de réduire la part de rayonnement qui arrive au niveau du sol, et inhibant par conséquence la croissance et la prolifération des adventices.

Le foin fauché est de qualité plus équilibrée en azote, et peu être envisagé aussi comme ensilage. Ce mélange produit un gain de 70% plus que la culture pur avec une meilleure couverture du sol pour contrôler les adventices et une meilleure valorisation des ressources du milieu (eau, lumière, éléments fertilisants).

La capacité de l'association fourragère à réduire les adventices : ce résultat est en accord avec les différents travaux réalisés sur les associations de cultures (Hauggaard-Nielsen *et al.*, 2001; Thorsted *et al.*, 2006). Cet accroissement de biomasse est dû essentiellement à une meilleure interception du rayonnement, les résultats de rayonnement absorbé montrant que l'association intercepte plus efficacement le rayonnement en comparaison avec la culture pur analysée dans les points précédants. Thorsted (2006) confirme que la réduction de la biomasse des adventices dans l'association blé-trèfle est due à une meilleure efficience de l'interception du rayonnement suite à l'augmentation de la biomasse produite par le mélange.

Notre étude a permis de mettre en évidence l'adaptation des légumineuses ou de la céréale par certains paramètres (biomasse, MS, la hauteur, SSF, GIAI, RC, Réflectance RBG) Ce résultat est cohérent avec l'idée qu'une biomasse importante résulte d'une acquisition importante d'éléments nutritifs et de lumière, qui de fait sont moins disponibles pour l'espèce associée,

réduisant en conséquence sa production. Or, la biomasse est l'expression de différents organes d'une plante qui contribuent à la compétitivité de l'espèce vis-à-vis de la lumière, tels qu'un feuillage dense et donc une surface foliaire importante.

Une étude expérimentale à monter, que la réflectance à l'échelle feuille au rouge et au vert pour Fouara et Sefrou ne montrent pas de différences significatives, mais au bleu, nous avons mis en évidence des différences significatives entre eux. La sénescence est corrélée positivement et significativement à la réflectance foliaire au rouge et au bleu. ( $r^2=0.78$ ,  $r^2=0.50$ , respectivement). La SSF est corrélée négativement et significativement à la réflectance au rouge et au bleu. ( $r^2=0.78$ ,  $r^2=0.29$ , respectivement) ; cela est expliqué par les variations de la teneur en chlorophylle détectables par la réflectance spectrale ; la réflectance s'est révélée être liée au développement des feuilles et à la sénescence. A l'échelle culture les moyennes de réflectance au rouge varie entre 33% pour Juanillo/Sefrou et 38.1% pour Sefrou. La réflectance au bleu était la plus élevée chez la culture pure Sefrou (40.08%). Les résultats d'analyse ANOVA montrent des différences significatives entre les cultures et les taux de recouvrement et l'index GLAI. La meilleure valeur a été enregistrée chez Faouara et Faouara/Sefrou et Juanillo/Sefrou. Enfin, le résultat de cette étude a prouvé l'efficacité de l'utilisation de l'analyse d'image.

Notre étude a permis d'évaluer aussi la variabilité des nodosités issues de la symbiose Rhizobium-pois fourrager. Les paramètres de milieu de la région d'étude présentent des propriétés favorables pour la vie microbienne et la fixation symbiotique. Le nombre, la couleur ainsi que la forme des nodules sont autant des facteurs actifs indiqués par la sécrétion d'une substance "leghémoglobine" qui confirme la présence de l'activité fixatrice d'azote par la bactérie *Rhizobium leguminosarum* au sein des tissus meristématiques centrales de la nodosité. Les nodosités sont globulaires, leur développement est maximal à la floraison de la plante hôte et atteint 21.66 nodules en moyennes sur les racines du pois en culture mixte avec le triticale. Il n'y a pas un effet significatif de nodulation sur la levée de la plante hôte. Cependant des différences significatives sont observées plus tard sur l'élongation des tiges, un nombre élevé de nodules se traduit par une augmentation de la hauteur des tiges en culture mixte triticale/pois (30.83 et 14.5 cm respectivement pour le triticale et le pois); une corrélation significative positive entre l'élaboration de la matière sèche et le nombre de nodules a été observé ( $r^2=0.86$ ). L'intensité de la nodulation est affectée par le type de semis en faveur du semis direct et le mode de culture mixte dont l'association la plus performante vis-à-vis du nombre de nodosités était celle du triticale-pois.

Les estimations, issues du traitement des photographies avec logiciel Mesirium Pro ont permis une correspondance significative élevée des résultats mesurés et ceux évalués par traitement d'image. Cela permet de contribuer à la validation d'une nouvelle méthode d'estimation par l'imagerie numérique, qui est nouvelle tendance dans l'analyse et d'estimation de la production par les couleurs des plantes. Pour mesurer les différents paramètres retenue (le taux de recouvrement, surface foliaire, surface sénescence et réflectance RGB) des photographies numériques prises par un appareil photo digital numérique combiné à un ordinateur et à des logiciels appropriés peut être utilisé pour photographier, numériser et évaluer par l'outil couleur des mesures facile afin obtenir des résultats rapides, précis, par des outils non destructifs et à un cout abordable. Cette méthode à montré globalement de bonnes performances nécessaire de poursuivre dans domaine de recherche agricole

### **Perspectives :**

\*Optimiser le fonctionnement et la performance des cultures associées dans le cadre de la conception de systèmes de cultures innovants répondant aux objectifs d'une agriculture plus durable en les testant chez les agriculteurs.

\* L'association pois-triticales apparait mieux adaptée aux systèmes de production et situations climatiques de la région semi aride en vue de mieux valoriser les jachères permettent d'accroître la productivité dans les conditions de faible disponibilité en azote tout en garantissant une certaine stabilisation des rendements face aux aléas climatiques

\*Poursuivre l'étude des traits des espèces et leurs réponses aux conditions environnementales sur la base de leurs tolérance et adaptation pour l'amélioration génétique des ces espèces, en les complétant de mesures complémentaires réalisées dans d'autres contextes pédoclimatiques.

\* Approfondir l'étude des interactions rhizosphériques entre les légumineuses et céréales en culture mixte.

## Références bibliographiques

1. **Abbes, K., Madani, T., Bencheikh, E.H & Merrauche, L. 2001.** Systèmes d'élevage ovin en zone semi aride céréalière : taille d'exploitation et caractère pastoral. *Médit*, **1**, 50-55.
2. **Abbes, K. & Abdelguerfi, A. 2005.** Perspectives d'avenir de la jachère pâturée dans les zones céréalières semi-arides, *Fourrages*, **184**, 533-546.
3. **Abdelguerfi, A., Abdelguerfi, R & Berrakia, R. 1987.** Le système blé-medicago : Pourquoi, où et comment ? ITGC, *Céréaliculture*, **16** : 5-44.
- 4 **Abdelguerfi, A. 2002.** Ressources Génétiques d'Intérêt Pastoral et/ou fourrager : Distribution et Variabilité chez les Légumineuses Spontanées (*Medicago*, *Trifolium*, *Scorpiurus*, *Hedysarum* et *Onobrychis*) en Algérie, Thèse d'Etat, INA Alger, 433 p..
5. **Abdellaoui, Z., Tissekrat, H., Belhadj A. & Zaghouane, O. 2010.** Etude comparative de l'effet du travail conventionnel, semis direct et travail minimum sur le comportement du blé dur. Actes du 4<sup>ème</sup> rencontre méditerranéen du semis direct. Sétif, Algérie, 68-82.
6. **Aboudrare, A. 2009.** Agronomie durable: principes et pratiques. Rapport de formation continue au profit des ingénieurs et des techniciens de l'ORLVAO de l'Ouazazate et de l'association Migrations et Développement. Projet FAO/TCP/MOR/3201 (D) relatif au renforcement des capacités locales pour développer les produits de qualité de montagne – Cas du Safran. Avril 2009.
7. **Adem, R. & Ferrah A. 2002.** Les ressources fourragères en Algérie. Analyse du bilan fourrager pour l'année 2001 : <http://désertification.wordpress.com/2017/02/16/ressources-fourragères-en-algérie.gredaal.com/>.
8. **Alkama, N., E.B.B. Bolou, H. Vailhe, L. Roger, S.M. Ounane & J.J. Drevon, 2009.** Genotypic variability in Puse efficiency for symbiotic nitrogen fixation is associated with variation of proton efflux in cowpea rhizosphere. *Soil Biol. Biochem.*, **41**(1), pp.841-1823.
9. **Allen, L., Sinclair, T. & Lemon E. 1977.** Radiation and microclimate relationships in multiple cropping systems. Stelly, M. (Editor-in-Chief): Multiple cropping. ASA, *Special Publication Number*, **27**: 171-200.
10. **Amossé, C., Celette, F., Jeuffroy, M. H. & David, C. 2013.** Association relais blé/légumineuses fourragères en système céréalier biologique : une réponse pour le contrôle des adventices et la nutrition azotée des cultures. *Innovations Agronomiques* **32**:21-33.
11. Anderson, M.K., H. Hauggaard-Nielsen, P., Ambus, E. & Jensen. S. 2004. Biomass production, symbiotic nitrogen fixation and inorganic N use in dual and tri-component annual intercrops. *Plant and Soil*, **266**: 273-287.
12. **Andrade, D.S., Colozzi-Filho, A. & Giller K.E. 2003.** The Soil Microbial Community and Soil Tillage, *CRC Press LLC*, Boca Raton. pp.51-81.

- 13. Anil, L., Park, R.H.P. & Miller, F.A .1989.** 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.
- 14. Angar, H., Ben Haj Saleh, H. & Ben-Hammouda, M. 2010.** Semis direct et semis conventionnel en Tunisie : les résultats agronomiques de 10 ans de comparaison. *Recherch Agronomique*, numéro spéciale, 9-13.
- 15. Anonyme. 1986.** Rapport du séminaire national sur les fourrages, du 21 au 22 juin 1986.
- 16. Anonyme. 2002.** Mémento de l'agronome. *CIRAD GRET*, France, 1700 pp.
- 17. Aouani, M. E., Beck, D.P. & Drevon J.J. 2003.** Enquête sur la nodulation du pois chiche au Nord de la Tunisie. In : Drevon J.J. & Sifi B. (Eds) Fixation symbiotique de l'azote et développement durable dans le bassin méditerranéen. INRA. Paris. *Les colloques n°100*. pp. 35-44.
- 18. Ardenghi, A F. 1989.** Efeito de metodos de prepare do solo e controle plantas daninhas sobre propriedodes fisicase quimicas de un loiossolo roxo eurofico, cultivado com mitho durante 10 anos, tese de Mestredo viçosa. UFV. Impr. Univ., 68p.

## B

- 19. Baenziger, M., Setimela, P.S., Hodson, D. & Vivek, B. 2006.** Breeding for improved abiotic stress tolerance in maize adapted to southern Africa. *Agric. Water Manage*, **80**:212–224.
- 20. Baghdadi, A., Ridzwan, A H., Ghasemzadeh, A., Ebrahimi, M., Radziah, O. & Martini, M. Y. 2016.** Effect of intercropping of corn and soybean on dry matter yield and nutritive value of forage corn. *Legume Research*, **39** (6): 976-981. *a*.
- 21. Baghdadi, A., Ridzwan, A .H., Ghasemzadeh A., Radziah, O., Martini. M. Y. & Mahdavi Atashgahi, A.R. 2016.** Productivity, relative yield and plant growth of forage corn intercropped with soybean under different crop combination ratio. *Legume Research*, **39** (4) : 558-564. *b*.
- 22. Baldy, C. 1974.** Etude fréquentielle du climat, influence sur la production des zones céréalières en Algérie. Document MARA, 52p.
- 23. Banik, P., Midya, A., Sarkar, B.K. & Ghose S.S. 2006.** Wheat and chickpea intercropping systems in an additive series experiment: advantages and weed smothering. *Eur. J. Agron*, **24**: 325-332.
- 24. Baret, F., & G., Guyot. 1991.** Potential and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sens Environ.*, **35**:161-173.
- 25. Becker, K. & Leithold, G. 2008.** Improvement of winter wheat baking quality in ecological cultivation by enlargement of row spacing and undersown intercrops. In: N. H. D. Neuhoff, T. Alföldi, W. Lockeretz, A. Thommen, I.A. Rasmussen, J. Hermansen, M. Vaarst, L. Lueck, F.,

Caporali, H. H. Jensen, P. Migliorini & H. Willer. (Ed.), Second Scientific conference of the International Society of Organic Agriculture Research (ISO FAR), 16th IFOAM Organic World Congress, Modèna, Italy. pp. 550-553.

- 26. Bedoussac, L. 2009.** Analyse du fonctionnement des performances des associations blé dur pois d'hiver et blé dur/féverole d'hiver pour la conception d'itinéraires techniques adaptés à différents objectifs de production en systèmes bas-intrants. Thèse de l'Université de Toulouse délivrée par l'Institut National Polytechnique de Toulouse. 218p.
- 27. 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 Soil*, **330**, 19-35.
- 28. Bedrani, S., Chehat, F. & Ababasa, S. 2001.** L'agriculture algérienne en 2000. Une révolution tranquille le PNDA, *Prospectives agricoles*, **1**, 7-51.
- 29. Beji, E. & Khemir. 2012.** Performances de deux associations fourragères, triticale/bersim et triticale/vesce dans un milieu semi-aride de Tunisie. *Fourrages*, **212** :337-342.
- 30. BenJeddi, F., Sanaa, M. & Behaeghe, T., 1998.** Contribution des légumineuses fourragères à l'amélioration de la réserve humique du sol. *Revue de L'INAT*, Vol. **13**(1) : 95-109.
- 31. Benniou, R. & Bernis, L. 2006.** Diversité des exploitations agricoles en région semi-aride algérienne. *Sécheresse*, **17**, 3, 399-406.
- 32. Benniou, R. 2012.** Agriculture conservation rôle of moisture and soil organic matter semi-arid. *Journal of Materials and Environmental Science*, **3**(1) : 91-98.
- 33. BenSalem, M. 1991.** Le triticale: origine, travaux réalisés et perspectives, Réseau TRAM (Réseau thématique de Recherche Agricole au Maghreb).
- 34. Bensemmane L. 2015.** Analyse de l'adaptation de l'orge (*Hordeum vulgare* L.) sous conditions semi-arides. Thèse de doctorat des sciences *Option : Biologie et physiologie végétales*. Département d'Ecologie et de Biologie végétales, Faculté SNV, Université Sétif-1. 130 pages.
- 35. Berendse, F. 1979.** Competition between plant populations with different rooting depths: I. Theoretical Considerations. *Oecologia*, **43**:19-26.
- 36. Bergkvist, G., Stenberg, M., Wetterlind, J., Bath, 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 Research*, **120**:292-298.
- 37. Berner, TS., Jacobsen, S. & Arneborg, N. 2013.** The impact of different ale brewer's yeast strains on the proteome of immature beer. *30*; 13: 215

- 38. Berntsen, J., Hauggaard-Nielsen, H., Olesen, J.E., Petersen, B. M., Jensen, E. S., & Thomsen, A. 2004.** Modelling dry matter production and resource use in intercrops of pea and barley. *Field Crops Res.*, 88:69-83.
- 39. 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.
- 40. Bir, A., Yakhlef, H. & Madani, T. 2015.** Autonomie alimentaire des systèmes d'élevage bovins laitiers dans la région semi-aride de Sétif (Algérie). *Fourrages*, 221, 85-91.
- 41. Blackmer, T. M., J. S. Schepers. & Varvel, G. E. 1994.** Light reflectance compared with other nitrogen stress measurements in corn leaves. *Agronomy Journal*, 86:934-938.
- 42. Blaser, B.C., Gibson, L.R., Singer, J.W. & Jannink J. L. 2006.** Optimizing seeding rates for winter cereal grains and frost-seeded red clover intercrops. *Agronomy Journal*, 98:1041-1049.
- 43. Blaser, B.C., Singer, J.W. & Gibson, L.R. 2011.** Winter cereal canopy effect on cereal and inter seeded legume productivity. *Agronomy Journal*, 103:1180-1185.
- 44. Bosch, M.W., Tamminga, S., Post, G., Leffering, C. P. & Muylaert, J. M. 1992.** Influence of stage of maturity of grass silages on digestion processes in dairy cows. 1. Composition, nylon bag characteristics, digestibility and intake. *Livestock Production Science*, 32, pp. 245-264.
- 45. Boufenar-Zaghouane F. & O. Zaghouane. 2004.** Guide des principales variétés de céréales à paille en Algérie. Ed. *ITGC-ICARDA.*, Alger, 154 pages.
- 46. Boulal, H. Zaghouane, O., El-mourid, M. & Rezgui, S. 2007.** Guide pratique de la conduite des céréales d'automne (blé et orge) dans le Maghreb (Algérie, Maroc et Tunisie). Edition *ITGC, INRA, ICARDA*, 176 p.
- 47. Bourbouze, A. 2000.** Pastoralisme au Maghreb : la révolution silencieuse. *Fourrages*, 161:3-21.
- 48. Bouzerzour, H. & Makhlouf, M., 1989.** L'influence des proportions du mélange des espèces de légumineuses et de céréales sur le rendement et la qualité des fourrages d'association. *Ann. Inst. Nat. Agron.* El-Harrach, 1383. Vol. 13, N° 1. 194-207.
- 49. Bouzerzour, H. & Dekhili, M. 1995.** Heritability, gains from selection and genetic correlation for yield of barley grown in two contrasting environments. *Field Crops Res.*, 41:173-178.
- 50. Bouzrara, S. & Ould Ferroukh, M.E.H. 2010.** Influence du semi direct et des techniques culturales simplifiées sur la productivité d'un sol de la ferme pilote Sersour (Sétif). *Rech Agro., Numéro spéciale*, 883-894.

- 51. Boyeux, M. & Magnard, A. 2013.** Cultures associées : l'union fait la force. *France Agricole*, **3488**, pp. 37–42.
- 52. Brakke, T. W., Smith, J. A. & Harnden, J. M. 1989.** Bidirectional scattering of light from tree leaves. *Remote Sensing of Environment*, Vol. **29**: p. 175-183.
- 53. Bruinenberg M. H., Valk H., Korevaar H., & Struik P. C. 2002.** Factors affecting digestibility of temperate forages from semi-natural grasslands: a review. *Grass and Forage Science*, **57**, pp. 292-301.
- 54. Bruno, J.F., Stachowicz, J.J. & Bertness, M.D. 2003.** Inclusion of facilitation into ecological theory. *Trends in Ecology and Evolution*, **18**(3), 119-125.
- 55. Bryson, R.J., Paveley, N.D., Clark, W.S., Sylvester-Bradley, R. & Scott, R.K. 1997.** Use of in-field measurements of green leaf area and incident radiation to estimate the effects of yellow rust epidemics on the yield of winter wheat. *European Journal of Agronomy*, **7**: 53-62.
- 56. Bushmann, C. & Nagel, E. 1993.** *In vivo* spectroscopy and internal optics of leaves as basis for remote sensing of vegetation. *Int J. Remote Sens*, **14**: 711-722.
- 57. Bulson, H.A., Snaydon R.W. & Stopes C.E. 1997.** Effects of plant density on intercropped wheat and field beans in an organic farming system. *J. Agric. Sci*, **128**, 59-71.
- 58. Buxton, D. R. & Casler, M. D. 1993.** Environmental and genetic effects on cell wall composition and digestibility. pp. 685-714. In: H. G. Jung, D. R. Buxton, R. D. Hatfield, and J. Ralph (ed.) Forage cell wall structure and digestibility. ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI. USA, pp. 685-714.
- 59. Buxton D. R. & Mertens D. R., 1995.** Quality-related characteristics of forages. Pages 83–93 in Forages: Vol II: The Science of Grassland Agriculture. R. F. Barnes, D. A. Miller, & C. J. Nelson, ed. Iowa State Univ. Press, Ames.

## C

- 60. Cahill, J.F. 2002.** Interactions between root and shoot competition vary among species. *OIKOS*, **99**: 101–112.
- 61. Caldwell, R.M., 1987.** Plant architecture and resource competition. *Ecological studies*, **61**: 164-179.
- 62. Callaway, R.M. 1995.** Positive interactions among plants. *Botanical Review*. **61**: 306-349.
- 63. Chapin, F. S., 1993.** Autumn K. & Pugnaire F. Evolution of suites of traits in relation to environmental stress. *American Naturalist*, **142**, pp. S78-S92.
- 64. Campillo, C., Garcia, M.I., Daza, C. & Prieto, M.H. 2010.** Study of a non-destructive method for estimating the leaf area index in vegetable crops using digital images. *HortScience*, **45** (10): 1459-1463.

- 65. Carof, M., Tourdonnet, S., Saulas, P., Le Floch D. & Roger-Estrade, J. 2007.** Undersowing wheat with different living mulches in a no-till system. II. Competition for light and nitrogen. *Agronomy for Sustainable Development*, **27**:357-365.
- 66. Carter, G.A. & Knapp, A.K. 2001.** Leaf optical properties in higher plants: linking chlorophyll concentration. *Am. J. Bot.*, **84**:677-684.
- 67. Ceccarelli, S. 2010.** Plant breeding and climate change. **In:** Ceccarelli, S. & Grando, S. (Eds) 2010. Proceedings of the 10th International Barley Genetics Symposium, 5-10 April 2008, Alexandria, Egypt, 16-29.
- 68. Cenpukdee, U. & Fukai, S. 1992.** Cassava/legume intercropping with contrasting cassava cultivars. 2. Selection criteria for cassava genotypes in intercropping with two contrasting legume crops. *Field Crops Res.*, **29**, 135-149.
- 69. Chatterton, L. & Chatterton, B. 1996.** Sustainable dryland farming: Combining farmer innovation and medic pasture in a Mediterranean climate. Cambridge University Press, Great Britain. 339 p.
- 70. Chennafi, H., Bouzerzoure, H., Saci, A & Chanafi, A. 2008.** La pratique des façons culturales du blé dur (*Triticum durum* Desf.) en environnement semi-aride. **In:** Proceeding of the 5th international conference on Land Degradation. Valenzanos, Bari, Italy, 18-22 Septembre 2008, pp. 63-67.
- 71. Chaudhary, M.I., Adu-Gyamfi, J.J., Saneoka, H., Nguyen, N.T., Suwa, R., Kanai S., El-Shemy, H.A., Lightfoot, D.A. & Fujita, K. 2008.** The effect of phosphorus deficiency on nutrient uptake, nitrogen fixation and photosynthetic rate in mashbean, mungbean and soybean. *Acta Physiologia Plantarum*, **30**: 537-544.
- 72. Chehat, F. & Bir, A. 2008.** Le développement durable de systèmes d'élevage durables en Algérie : contraintes et perspectives. Colloque Int. Développement durable des productions animales : enjeux, évaluation et perspectives, INA, Algérie, 12 p.
- 73. Clawson, D.L. 1985.** Harvest Security and Intraspecific Diversity in Traditional Tropical Agriculture. *Economic Botany*, **39**:56-67.
- 74. Coquil, X., Trommschlager, J.M, Bazard, C., Despres, S. & elaby, L. 2009.** Valorisation par les vaches laitières de mélanges céréales/protéagineux fermiers dans une ration hivernale. *Innovations Agronomiques*, **4** : 145-149
- 75. Corre-Hellou, G. & Crozat Y. 2004.** Interspecific competition for soil N in pea-barley mixtures during the vegetative phase and consequences on N<sub>2</sub> fixation. In 5th Conference on Grain Legumes, Dijon, France. pp. 65- 66.
- 76. 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, Université d'Angers. 172p.

- 77. Corre-Hellou, G., Fustec, J. & Crozat, Y. 2006.** Interspecific competition for soil N and its interactions with N<sub>2</sub> fixation, leaf expansion and crop growth in pea-barley intercrops. *Plant and Soil*. **282**: 195–208.
- 78. Corre-Hellou, G., Brisson, N., Launay, M., Fustec, J., & Crozat, Y. 2007.** Effect of root depth penetration on soil nitrogen competitive interactions and dry matter production in pea-barley intercrops given different soil nitrogen supplies. *Field Crops Research*, **103**(1): 76–85.
- 79. Corre-Hellou, G., A. Dibet, H. Hauggaard-Nielsen, Y. Crozat, M. Gooding, P. Ambus, C. Dahmann, P. Von Fragstein, A. Pristeri, M. Monti. & E.S. Jensen, 2011.** Competitive ability of pea-barley intercrops against weeds and interactions with crop productivity and soil N acquisition. *Field Crops Research*, **122**: 264-272.
- 80. Corre-Hellou, G., Bedoussac, L., Bousseau, D., Chaigne, G., Chataigner, C., Celette, F., Cohan, J., Coutard, J., Emile, C. & Floriot, M. 2013.** Associations cereale-égumineuse multi-services. *Innovations Agronomiques*, **30** : 41-57.
- 81. Cornelisson, J. H. C., Castro-Diez, P. & Hunt, R. 1996.** Seedling growth, allocation and leaf attributes in a wide range of woody plant species and types. *Journal of Ecology*, **84**, p. 755-765.
- 82. Cookson, W.R., Murphy, D.V. & Roper, M.M. 2008.** Characterizing the relationships between soil organic matter components and microbial function and composition along a tillage disturbance gradient. *Soil Biology and Biochemistry*, **40**: 763-777.
- 83. Coulombel, A. & Roinsard, A. 2013.** Associations céréales/protéagineux. Valorisation en alimentation animale. *Alter Agri* **120**, 6–19.
- 84. Crookston, R., Treharne, K., Ludford, P. & Ozbun J., 1975.** Response of beans to shading. *Crop Sci.* **15**, 412-416.
- 85. Cudney, D. W., Jordan, L.S. & Hall, H.E. 1991.** Effect of wild oat (*Avena fatua*) infestation on light and growth rate of wheat. *Weed Sci.* **39**: 175–179.
- 86. Cunningham S. A., Summerhayes B. & Westoby M. 1999.** Evolutionary divergences in leaf structure and chemistry, comparing rainfall and soil nutrient gradients. *Ecological Monographs*, **69**, pp. 569-588.

## D

- 87. Danso, S.K.A. 1995.** Sustainable agriculture: The role of biological nitrogen fixing plants. In: Nuclear techniques in soil-plant studies for sustainable agriculture and environmental preservation. Proceedings ; Proceedings Series (IAEA) ; International Symposium on Nuclear and Related Techniques in Soil-Plant Studies on Sustainable Agriculture and Environmental Preservation, Vienna (Austria), 17-21 Oct 1994 / IAEA, Vienna (Austria); FAO, Rome (Italy), pp. 205-229.
- 88. Davis, J.H.C. & Wolley, J.N. 1993.** Genotypic requirement for intercropping. *Field Crops Res.* **34**:407-430.

**89. Dajoz, R. 1985.** Précis d'écologie. Bordas, Paris, 505pp.

**90. Dissanayaka, D.M.S.B., Maruyama, H., Masuda, G. & Wasaki. 2015.** Interspecific facilitation of P acquisition in intercropping of maize with white lupin in two contrasting soils as influenced by different rates and forms of P supply. *Plant and Soil*, 390: 223-236.

**91. Deinum B. & Dirven J. G. P. 1971.** Climate, nitrogen and grass. 4. The influence of age on chemical composition and *in vitro* digestibility of maize (*Zea mays* L.) and tallfescue (*Festuca arundinacea* Schreb.). *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 19, pp. 264-272.

**92. De Wit, C. T. & Van Den Bergh, J. P. 1965.** Competition between herbage plants. *Netherlands Journal of Agricultural Science*. **13**: 212-221.

**93. De Ruiter, J.L. 2001.** Growth potential of spring forage cereals for silage. *Agronomy, N.Z.*, **31**: 99-107.

**94. Drevon, J.J., Boyer, G., Metral, R., Payre, H. & Pouliquen, R. 2003.** Enquête agronomique sur la nodulation du haricot en lauragais. **In**: Drevon, J.J. & Sifi, B. (Eds): Fixation symbiotique de l'azote et développement durable dans le bassin méditerranéen. INRA. Paris. *Colloques*, n°100 : 59-68.

**95. Drouin, P., Prevost, D. & Antoun, H. 1996.** Classification of bacteria nodulating *lathyrus japonicus* and *lathyrus pratensis* in northern Quebec as strains of *Rhizobium leguminosarum* biovar *viciae*. *International Journal of Systematic Bacteriology*. **46**: 1016-1024.

**96. Duru, M., Calvière, I. & Tirilly, V. 1995.** Evolution de la digestibilité *in vitro* du dactyle et de la fétuque élevée au printemps. *Fourrages* b, **141**, pp. 63-74. Croissance hivernale et printanière des prairies permanentes pâturées en montagne. I.-Écophysiologie du dactyle. *Agronomie*, **7**, (1), pp. 41-50.

## E

**97. Edwards, L. 1998.** Comparison of two spring seeding methods to establish forage cover crops in relay with winter cereals. *Soil and Tillage Research*, **45**: 227-235.

**98. Exner, D.N. & Cruse, R.M. 1993.** Interseeded Forage Legume Potential as Winter Ground Cover, Nitrogen Source and Competitor. *Journal of Production Agriculture*, **6**: 226-231. DOI: <http://dx.doi.org/10.2134/jpa1993.0226>.

## F

**99. Fallon, E., 2003.** Évolution du rendement, de la proportion des calibres et du taux d'humidité des pois (*Pisum sativum* L.) destinées à la transformation. Mémoire de maîtrise en sciences de l'agriculture et de l'alimentation, Université Laval, Québec. pp. 31-33.

**100. FAO, 2000.** Are grasslands under threat? Brief analysis of FAO statistical data on pasture and fodder crops. 28p

- 101. FAO. 2006.** Deuxième rapport national sur l'état des ressources phytogénétiques. INRAA.FAO, 96p.
- 102. Fick, G. W., Wilkins, P. W. & Cherney, J. H. 1994.** Modeling forage quality changes in the growing crop. pp. 757-795. In: G. C. Fahey, M. Collins, D. R. Mertens, and L. E. Moser [Eds.]. Forage quality, evaluation and utilization. Madison, WI: *American Society of Agronomy*. Pp.757–795.
- 103. Francis, C. 1981.** Development of plant genotypes for multiple cropping systems. *Plant Breed.* **2**:179–231.
- 104. Franklin, K.A. 2008.** Shade avoidance. *New Phytologist*, 179: 930–944 deposition of legumes: *A review Agron. Sustain. Dev.*, **30**:57–66.
- 105. Fukai, S. 1993.** Introduction. Intercropping - Bases of productivity. *Field Crops Res.* **34**: 239-245.
- 106. Fustec, J., Lesuffleur, F., Mahieu, S. & Cliquet, J.B. 2010.** Nitrogen Rhizodeposition of Legumes. *Sustainable Agriculture*, Vol.2, pp.868-881.

## G

- 107. Garnier, E. 1992.** Growth analysis of congeneric annual and perennial grass species. *J. Ecol.*, **80**, pp. 665-675.
- 108. Garratt, J.R. 1993.** Sensitivity of climate simulations to land-surface and atmospheric boundary-layer treatments- a review. *Journal of Climate*, 6:419-449.
- 109. Gastal, F. & Lemaire, G. 1988.** Study of a tall fescue sward grown under nitrogen deficiency conditions. Proceedings of the 12th General Meeting of the European Grassland Federation, Dublin, Ireland, pp. 323-327
- 110. Gastal, F. & Belanger, G., 1993.** The effects of nitrogen fertilization and the growing season on photosynthesis of field-grown tall fescue (*Festuca arundinacea* Schreb.) canopies. *Ann. Bot.*, **72**: 401- 408.
- 111. Goldberg, D.E. & Landa K. 1991.** Competitive Effect and Response: hierarchies and Correlated Traits in the Early Stages of Competition. *The Journal of Ecology*, **79**:1013–1030.
- 112. Gosse, G., Varlet-Grancher, C., Bonhomme, R. & Chartier, M. 1986.** Maximum dry matter production and solar radiation intercepted by a canopy. *Agronomy*, **6**, 47-56.
- 113. Gibson, K. E., Kobayashi, H. & Walker GC. 2008.** Molecular determinants of a symbiotic chronic infection. *Annual Review of Genetics*. **42**: 413–441.
- 114. Giraud, E. & Fleischman, D. 2004.** Nitrogen-fixing symbiosis between photosynthetic bacteria and legumes. *Photosynth. Res.*, **82**, 115-130.

- 115. Gitelson, A.A. & Merzlyak, M.N. 1994.** Quantitative estimation of chlorophyll a using reflectance spectra: Experiments with autumn chestnut and maple leaves. *J. Photo. Photobiol (B)***22**:247-252.
- 116. Gitelson, A. A., Merzlyak, M. N. & Chivkunova O. B. 2001.** Optical properties and nondestructive estimation of anthocyanin content in plant leaves. *Photochemistry and Photobiology*,**74**: 38-45.
- 117. Gower, S.T., Kucharik, C.J. & Norman, J.M., 1999.** Direct and indirect estimation of leaf area index, the Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation (FAPAR), and net primary production of terrestrial ecosystems. *Remote Sens. Environ.*, **70**: 29-51.
- 118. Graham, PH. & Vance, CP.2003.** Legumes: importance and constraints to greater use. *Plant Physiol*,**131**: 872–877.
- 119. Grant, L. 1987.** Diffuse and specular characteristics of leaf reflectance. *Rem. Sens. Environ.* **22**: 309-322.
- 120. Groot, J. C. J. & Neutboom, J. H. 1997.** Composition and digestibility during ageing of Italian ryegrass leaves of consecutive insertion levels. *Journal of Science of Food and Agriculture*, **75**, pp. 227-236.
- 121. Guendouz, A., Guessoum, S., Maamri, K. & Hafsi, M. 2012.** Predicting the efficiency of using the RGB (Red, Green and Blue) reflectance for estimating leaf chlorophyll content of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) genotypes under semi-arid conditions. *American-Eurasian Journal of Sustainable Agriculture*,**6**(2):102-106.

## H

- 122. Hacker, J. B. & Minson, D. J. 1981.** The digestibility of plant parts. *Herbage Abstr.*, **51**, pp. 459-482.
- 123. Hafsi, M., Hadji, A., Semcheddine, N., Rouabhi, A., Djekoun A., (2009).** Sélection for greater agronomic water use efficiency in wheat using carbon isotope discrimination in Algérie. *Sci. Technol.*, **29**: 63-71
- 124. Hagggar, R. J. & Ahmed, M. B. 1971.** Seasonal production of *Andropogon gayanus*. 3. Changes in the crude protein content and *in vitro* dry matter digestibility of leaf and stem portions. *Journal of Agricultural Science, Cambridge*, **77**, pp. 47-52.
- 125. Hamadache A., 2001.** Les ressources fourragères actuelles en Algérie. Situation et possibilité d'amélioration. In Actes de l'atelier national sur la stratégie du développement des cultures fourragères en Algérie. Ed. ITGC, 79p.
- 126. 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
- 127. Hamrit, S., 1995.** Situation des fourrages en Algérie. *Al Awamia* - **89** - Juin 1995. Pp.97-108.

- 128. Hartl, W. 1989.** Influence of undersown clovers on weeds and on the yield of winter wheat in organic farming. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **27**:389-396.
- 129. Hartwig, N.L. & Ammon, H.U. 2002.** Cover crops and living mulches. *WeedScience*,**50**:688-699.
- 130. Hauggaard-Nielsen, H., Ambus,P. & Jensen, E. S. 2001.** Interspecific competition, N use and interference with weeds in pea-barley intercropping. *Field Crops Res.* **70**:101-109.
- 131. Hauggaard-Nielsen, H., Ambus, P.& Jensen, ES. 2003.** The comparison of nitrogen use and leaching in sole cropped versus intercropped pea and barley. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, **65**, 289-300.
- 132. Hauggaard-Nielsen, H., Andersen M.K., Jornggaard B., Jensen E.S., 2006.** Density and relative frequency effects on competitive interactions and resource use in pea-barley intercrops. *Field Crops Research*,**95**: 256-267.
- 133. 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 N<sub>2</sub>-fixation, soil N<sub>2</sub> acquisition and use of other nutrients in European organic cropping systems. *Field Crops Research*,**113** : 64–71.
- 134. Hechmi, N. 1999.** Etude comparée de quelques associations annuelles graminée – légumineuse en zone humide de Tunisie. *Fourrages*, **159** : 269-275.
- 135. Heller, R. 1995.** Abrégé de Physiologie Végétale. Tome 2. Développement. Masson, Paris, 315 pp.
- 136. Horwith, B. 1985.** A role for intercropping in modern agriculture. *Bioscience*,**35**: 286–291.
- 137. Huyghe, C., 2003.** Les fourrages et la production de protéines. *Fourrages*,**174**, 145-162.
- 138. Hinsinger, P., Betencourt, E., Bernard, L., Brauman, A., Plassard, C., Shen J., Tang, X. & Zhang, F.2011.** P for two, sharing a scarce resource soil phosphorus acquisition in the rhizosphere of intercropped species. *Plant Physiology*. **156**: 1078-1086.

## I

- 139.ITGC.2009.**La politique du renouveau de l'économie agricole et rurale du ministere de l'agriculture et du developpemnrural. Volume 1. *Céréaliculture*. Revue technique et scientifique.Institut Technique des Grandes Cultures (ITGC). . L'Algérie. Revue n° **52**. ISSN 1011-9582. pp. 40-42.

## J

- 140. Jahansooz, M. R., Yunusa, I. A. M., Coventry, D. R., Palmer, A. R. & Eamus, D. 2007.** Radiation and wateruse associated with growth and yields of wheat and chickpea in sole and mixed crops. *Eur. J. Agron.*,**26**:275-282.

- 141. Jakubauskas, M.K. & Price, K.P., 1997.** Empirical relationships between structural and spectral factors of Yellowstone lodgepole pine forest. *Photogram. Eng. Rem. Sens.*, **63**, 1375-1381.
- 142. Jarrige, R., Demarquilly, C., et al. 1995.** Les constituants de l'appareil végétatif des plantes fourragères. **In:** Jarrige, R., Ruckebusch, Y. and Demarquilly, C., Eds., *Nutrition des ruminants domestiques, ingestion et digestion*, INRA, Paris, 25-82.
- 143. Jensen, E.S.; Ambus, N.; Bellostas, N.; Boisen, S.; Brisson, N.; Corre-Holou, G.; Crosat, Y. ; Dahlman, C. ; Dibet, A.; Fragstein, F.; Gooding, M. ; Hauggaard-Nielsen, H.; Kasyanova, E.; Launay, M. & Pristeri, A.2006.** Intercropping of cereals and grain legumes for increased production, weed control, improved product quality and prevention of N-losses in European organic farming systems, *Proceedings of the European Joint Organic Congress*, pp. 180–181, ISBN 87-991343-3-0, Odense, Denmark, May 30-31, 2006.
- 144. Jensen, E.S.1996.** Grain yield, symbiotic N<sub>2</sub> fixation and interspecific competition for inorganic N in pea-barley intercrops. *Plant and Soil*. **182**:25–38.
- 145. Jensen, E.S., & Hauggaard-Nielsen, H., 2003.** How can increased use of biological N<sub>2</sub> fixation in agriculture benefit the environment? *Plant Soil*, **252**: 177–186.
- 146. Jones, A.S. & Hamlyn, G. 1992.** Plants and microclimate: A quantitative approach to environment plant physiology, Second Edition, ref. QK754.5J66, 1992, Cambridge University Press. 428p.
- 147. Jordan, D. C. 1984.** Family III. *Rhizobiaceae*, pp. 234-242. **In:** N. R. Krieg, and J. G. Holt (Eds.), *Bergey's manual of systematic bacteriology*. Williams and Wilkins Co, Baltimore, pp.234-242.

## K

- 148. Kadi, Z., F. Adjel, H. Bouzerzour. 2010.** Analysis of the genotype x environment interaction of barley grain yield (*Hordeum vulgare L.*) under semi-arid conditions. *Adv. Environ. Biol.*, **4**: 34-40.
- 149. Kang, Y.K. & Kang, H.S. 1991.** Effect of cutting on forage production and grain yield of naked barley cultivars. *Korean Journal of Crop Sciences*, **36**: 294-299.
- 150. Kammoun, B. 2014.** Analyse des interactions génotype x environnement x conduite culturale de peuplements bispécifiques de cultures associées de blé dur et de légumineuses à graines, à des fins de choix variétal et d'optimisation de leurs itinéraires techniques. *Thèse Doctorat, Université de Toulouse*, 172p.
- 151. Känkänen, H. & Eriksson, C., 2007.** Effects of undersown crops on soil mineral N and grain yield of spring barley. *Eur. J. Agron.*, **27**, 25-34.
- 152. Keddy, P.2001.** Studying competition. *Kluwer Acad. Publ.* 59p.

- 153. Keith, R. & Baldwin, M., 2006.** Rotation des cultures dans les exploitations biologiques, CEFS.
- 154. Khaldoun, A., Bellah, F. & Amroun, R. 2000.** Perspectives de développement des cultures fourragères en Algérie. ITGC, *Céréaliculture*, N°34 : 40-46.
- 155. Klein, R.M.1992.** Effects of green light on biological systems. *Biol.Rev.*, **67**:199-284.
- 156. Klein, H.D., Rippstein, G., Huguenin, J., Toutain, B., Guerin, H. & Louppe, D.,2014.** Les cultures fourragères. Editions Quae, CTA, Presses agronomiques de Gembloux. 262p.
- 157. Knops, J. M. H & Reinhart, K. 2000.** Specific leaf area along a nitrogen fertilization gradient. *American Midland Naturalist* ,**144** (2), pp. 265-272.
- 158. Kribaa, M.2003.** Effet de la jachère sur les sols en céréaliculture pluviale dans les zones semi-arides méditerranéennes. Cas des hautes plaines sétifiennes en Algérie. *Thèse de Doctorat d'Etat en Sciences Agronomiques*, INA El-Harrach, Alger, 121p.
- 159. Kribaa, M., V. Hallaire, P. Curmi & R. Lahmar.2001.** Effects of various cultivation methods on the structure and hydraulic properties of soil in a semi-arid climate. *Soil & Tillage Research*, **60**: 43-53.

## L

- 160. Lambers, H. & Poorter, H.1992.** Inherent variation in growth rate between higher plants: a search for physiological causes and ecological consequences. *Adv. Ecol. Res.*, **23**, pp. 187-261.
- 161. Lanini, W.T., Orloff, S.B., Vargas, R.N., Orr, J.P., Marble, V.L. & Grattan S.R. 1991.** Oat companion crop seeding rate effect on alfalfa establishment yield, and weed control. *Agronomy Journal*, **83**:330-333.
- 162. 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.
- 163. Lecomte, P. & Parache, P.1993.** L'association avoine/pois: une culture fourragère adaptée aux régions de demi-altitude et utilisable comme plante abri d'un semis fourrager. *Fourrages*, **134**, 211-216
- 164. Lemaire, G., Gastal, F., 1997.** N uptake and distribution in plant canopies. **In:** Lemaire G. (Ed.). Diagnosis of the nitrogen status in crops. *Springer*, pp. 3-43
- 165. Lemaire, G., Cruz, P & Wery, Y. J. 1999.** Ecophysiologie des plantes fourragères tropicales. **In:** *Cultures fourragères tropicales*. (Eds) Roberge G & Toutain B., Montpellier, CIRAD, pp. 19-51.

- 166. Lichtenthaler, H. K., Wenzel, O., Buschmann, C. & Gitelson, A. 1998.** Plant stress detection by reflectance and fluorescence. *Annals of the New York Academy of Sciences*, **851**: 271-285.
- 167. Lithourgidis, AS., Vasilakoglou, IB., Dhima, KV., Dordas, CA. & Yiakoulaki M.D. 2006.** Forage yield and quality of common vetch mixtures with oat and triticale in two seeding ratios. *Field Crops Res.*, **99**:106–113.
- 168. Lithourgidis, A. S., Dordas, C.A., Damalas, C.A. & Vlachostergios, D.N. 2011.** Annual intercrops: an alternative pathway for sustainable agriculture: A review *Austr. J. Crop Science*, **5**: 396–410.
- 169. Liu, Y., Wu, L., Baddeley, J. & Watson, C. 2011.** Models of biological nitrogen fixation of legumes. A review. *Agron Sustain. Dev.*, **31**: 155–172.
- 170. Litrico, I., Goldringer, I. & Enjalbert, J., 2015.** Plusvalue de la diversité génétique intraparcelle pour la stabilité de la production et autres services écosystémiques. *Innovations Agronomiques*, **43**, pp.7–18.
- 171. Louarn, G., Corre-Hellou, G., Fustec, J., Lô-Pelzer, E., Julier, B., Litrico, I., Hinsinger, P. & Lecomte, C. 2010.** Déterminants écologiques et physiologiques de la productivité et de la stabilité des associations graminées-légumineuses. *Innovations Agronomiques*, **11** : 79-99.
- 172. Loomis, R.S. & Williams, W.A., 1963.** Maximum crop productivity: an estimate. *Crop Sci.*, **3**, 67-72.

## M

- 173. Madakadze, R.M., Kodzanayi, T. & Mugumwa, R. 2007.** Effect of plant spacing and harvesting frequency on *Corchorus olitorius* leaf and Seed yields. In: Kasem ZA, Abdel-Hakim MM, Shalabi SI, El-Morsi AEM, Hamady AMI (Eds). *African Crop Science Proceedings*, Vol 8, El-Minia, Egypt, **27(31)**: 279-282.
- 174. Mahieu, S., Germon, F., Aveline, A., Hauggaard-Nielsen, H., Ambus, P. & Jensen, E.S. 2009.** The influence of water stress on biomass and N accumulation, N partitioning between above and below ground parts and on N rhizodeposition during reproductive growth of pea (*Pisum sativum* L.). *Soil Biology and biochemistry*, **41**:380-387.
- 175. Maingi, J. M., Shisanya, C. A., Gitonga, N. M. & Hornetz, B., 2001.** Nitrogen fixation by common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in pure and mixed stands in semi-arid South-East Kenya. *European Journal of Agronomy*, **14** (1), 1-12.
- 176. Malézieux, E., Y. Crozat, C. Dupraz, M. Laurans, D. Makowski, H. Ozier-Lafontaine, B. Rapidel, S. De Tourdonnet & M. Valantin-Morison. 2009.** Mixing plant species in cropping systems: concepts, tools and models. A review. *Agron. Sustain. Dev.*, **29**: 43-62.

- 177. Marshall, B. & Willey, R. 1983.** Radiation interception and growth in an intercrop of pearl millet/groundnut. *Field Crops Res.* **7**, 141-160.
- 178. Martin, M.P., L.D. & Snaydon, R.W. 1982.** Intercropping barley and beans: effect of planting pattern. *Exp. Agric.*, **18**: 139–148.
- 179. Mebarkia, A. & Abdelguerfi, A. 2007.** Etude du potentiel agronomique de trois espèces de vesces (*Vicia spp.*) et variabilité dans la région semi-aride de Sétif (Algérie). *Fourrages*, **192**, 495-506.
- 180. Mei, P.P., Guid, L.G., Wange, P., Huangd, J.C., Longf, H.Y., Christie, P. & Li L. 2012.** Maize/faba bean intercropping with rhizobia inoculation enhances productivity and recovery of fertilizer P in a reclaimed desert soil. *Field Crops Research*, **130**: 19–27.
- 181. Menad, A., Meziani, N., Bouzerzour H, & Benmahammed, A. 2011.** Analyse de l'interaction génotype x milieu du rendement de l'orge (*Hordeum vulgare* L.) : application des modèles AMMI et la régression conjointe. *Nature & Technology* (Université Chlef), **5** : 99-106.
- 182. Mesurim. 2010..**  
<http://www.acamiens.fr/pedagogie/svt/info/logiciels/Mesurim2/Telecharge.htm>.
- 183. Meziani, N., Bouzerzour, H., Benmahammed, A., Menad, A. & Benbelkacem, A. 2011.** Performance and adaptation of Barley genotypes (*Hordeum vulgare* L.) to diverse locations. *Advances in Environmental Biology*, **5**: 1465-1472.
- 184. Mezni M., Blzld E. & Kalboussi, R. 2000.** Recherche d'associations fourragères adaptées en Tunisie. Cas de l'association bersim/ray-grass d'Italie en zone irrigable, *Fourrages*, **161** : 61-68.
- 185. Midmore, D. J. 1993.** Agronomic modification of resource use and intercrop productivity. *Field Crops Res.* **34**:357-380.
- 186. Monteith, J., 1977.** Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, B 281, 277-294.
- 187. Mossab, M. 2007.** Contribution à l'étude de l'exploitation à double fin de l'orge (*Hordeum vulgare* L.) en zone semi-aride d'altitude. Mémoire de magistère, ENSA-El Harrach. Alger, 90p.
- 188. Mouafek, A. 2010.** La symbiose à rhizobia chez la fève (*Vicia faba* L.) et La luzerne (*Medicago sativa* L.) dans la région de Biskra. Mémoire de Magistère. Université Biskra. 106p.
- 189. Mrabet, R. 2001.** No-Tillage System: Research Findings, Needed Developments and Future Challenges for Moroccan Dryland Agriculture. In: proceedings of International Congress on Conservation Agriculture. Garcia-Torres *et al.* (Eds). Madrid, Spain. October 1-5, 2001. Pp. 737-741.

**190. Mutch, D.R., Martin, T.E. & Kosola, K.R. 2003.** Red clover (*Trifolium pratense*) suppression of common ragweed (*Ambrosia artemisiifolia*) in winter wheat (*Triticum aestivum*). *Weed Technology*, **17**:181-185.

## N

**191. Naudin, C., Corre-Hellou, G., Pineau S., Crozat Y. & Jeuffroy M.H. 2010.** The effect of various dynamics of N availability on winter pea-wheat intercrops: crop growth, N partitioning and symbiotic N<sub>2</sub> fixation. *FieldCrops Research*. **119**:2-11.

**192. Naudin, C., Corre-Hellou, G., Pineau S., Crozat Y. & Jeuffroy M.H. 2014.** Life cycle assessment applied to pea-wheat intercrops: a new method for handling the impacts of co-products. *Journal of Cleaner Production*, **73**, 80-87.

**193. Ndzana, R.A., Magro, A., Bedoussac, L., Justes, E., Journet, E.-P. & Hemptinne, J.-L., 2014.** Is there an associational resistance of winter pea-durum wheat intercrops towards *Acyrtosiphon pisum* Harris? *J. Appl. Entomol.* **138**, 577-585.

**194. Nelson, C. J. & Moser, L. E. 1994.** Plant factors affecting forage quality. In: G. C. Fahey, Collins M., Mertens D. R. & Moser L. E. [Eds.]. Forage quality, evaluation and utilization. Madison, WI: *American Society of Agronomy*, pp. 115-154.

## O

**195. Ofori, F. & Stern, W.R. 1987.** Cereal legume intercropping systems. *Advances in Agronomy*. **41**: 41-90.

**196. Oke, V. & Long, S.R. 1999.** Bacteroid formation in the rhizobium-legume symbiosis. *Current opinion in microbiology*. **2**:641-646.

**197. Olesen, J.E., Askegaard, M., Rasmussen, I.A. 2009.** Winter cereal yields as affected by animal manure and green manure in organic arable farming. *European Journal of Agronomy*, **30**:119-128.

**198. Oswald, A., Ransom, J.K., Kroschel, J., Sauerborn, J. 2002.** Intercropping controls *Striga* in maize based farming systems. *Crop Protection*, **21**: 367-374.

**199. Oukinder, M. & Jacquard, P. 1986.** Production et valeur nutritive de l'association vesce-avoine méditerranéenne. *Fourrage*, **105** :39-62.

**200. Oukinder, M. & Jacquard, P. 1988.** Modèle d'association graminée-legumineuse : le mélange vesce-avoine. *Revue Agronomie*, **8**(2) :97-106.

## P

**201. Palmer, KM. & Young, JPW. 2000.** Higher diversity of *Rhizobium leguminosarum* by *viciae* populations in arable soils than in grass soils. *Applied and Environmental Microbiology*. **66**:2445-2450.

**202. Paul, K.I., Polglase, P.J., O'Connell, A.M., Carlyle, J.C., Smethurst, P.J. & Khanna, P.K. 2003.** Defining the relation between soil water content and net nitrogen mineralization. *European Journal of Soil Science* 54:39-48. DOI: <http://dx>.

**203. Pelzer, E., Bazot, M., Makowski, D., Corre-Hellou, G., Naudin, C., Al Rifaï, M., Baranger, E., Bedoussac, L., Biarnès, V., Boucheny, P., Carrouée, B., Dorvillez, D., Foissy, D., Gaillard, B., Guichard, L., Mansard, M.-C., Omon, B., Prieur, L., Yvergniaux, M., Justes, E. & Jeuffroy, M.H., 2012.** Pea-wheat intercrops in low-input conditions combine high economic performances and low environmental impacts. *European Journal of Agronomy*. **40**, 39–53.

**204. Pelzer, E., Soulié, M. & Jeuffroy, M.H. 2014.** Grass-legume intercrops to produce biomass for bioenergy. Proceeding of the congress of the American Society of Agronomy, Long Beach, US, 3-5 November, 2014.

**205. Perret, X., Staehelin, C. & Broughton, W.J. 2000.** Molecular basis of symbiotic promiscuity. *Microbiol. Molec. Biol. Rev.* **64**: 180-201.

**206. Picard, D., Ghiloufi, M., Saulas, P. & Tourdonnet, S. 2010.** Does undersowing winter wheat with a cover crop increase competition for resources and is it compatible with high yield? *Field Crops Res.*, **115**, 9-18.

**207. Poorter, H. & Remkes, C. 1990.** Leaf area ratio and net assimilation rate of 24 wild species differing in relative growth rate. *Oecologia*, **83**, pp. 553-559.

**208. Prince, S.D., 1991.** A model of regional primary production for use with coarse resolution satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, **12**(6), 1313-1330.

## R

**209. Raunet, M., 2002.** Projet de recherche-développement sur le semis direct avec couverture végétale en Tunisie, pp. 21. <http://agroecologie.CIRAD>.

**210. Rainey, K.M. & Griffiths, P.D. 2005.** Inheritance of heat tolerance during reproductive development in snap bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *J. Am. Soc. Hortic. Sci.*, **130**:700-706

**211. Reich, P. B., Uhl, C., Walters, M. B & Ellsworth, D. S. 1991.** Leaf lifespan as determinant of leaf structure and function among 23 amazonian tree species. *Oecologia*, **86**, pp. 16-24.

**212. Reich, P. B., Walters, M. B. & Ellsworth, D. S. 1992.** Leaf life-span in relation to leaf, plant and stand characteristics among diverse ecosystems. *Ecol. Monogr*, **62**, pp. 365-392

**213. Reich, P. B., Walters M. B. & Ellsworth D. S. 1997.** From tropics to tundra: Global convergence in plant functioning. *Proceedings of the national Academy of Science, USA*, **94**, pp. 13730-13734.

**214. Remison, S.U. & Snaydon, R.W. 1980.** A comparison of root competition and shoot competition between *Dactylis glomerata* and *Holcus lanatus*. *Grass and Forage Science*, **35**: 183-187.

- 215. Riah, N. 2014.** Diversité et structure génétique des populations de *Rhizobium leguminosarum* biovar. *viciae* isolées du pois (*Pisum sativum* L.) et de la lentille (*Lens culinaris* medik.) cultivées dans deux zones éco-climatiques subhumide et semi-aride de l'Est algérien, Thèse de Doctorat, Univ. de Constantine, Alger.119p.
- 216. Rice, E.L.1984.** Allelopathy. *Academic Press*, Orlando.422p.
- 217. Rotili, P. 1979.** Contribution à la mise au point d'une méthode de sélection de la luzerne prenant en compte les effets d'interférences entre individus. 1. Etude expérimentale de la structure de la luzerne. *Ann.Amélior.Plant*, **29** (4), 353-381.
- 218.Rosenberg, N.J., Blad, B.L. & Verma, S.B. 1983.** Microclimate: The biological environment. *Wiley-Interscience*, New York, pp. 255-257.
- 219. Rouabhi, A.2014.** Implantation deschangements climatiques dans l'agriculture et le développement durable. Cas des haute plaines Sétifiennes. Thèse de Doc., Univ de Sétif, Algérie. 144p.
- 220. Rupela, O. P & Dart, P.J. 1980.** Research on symbiotic nitrogen fixation by chickpea at ICRISAT. **In:** Proceedings of the international workshop on chickpea improvement. ICRISAT. Hyderabad. Andra Pradesh. India.

## S

- 221. Sahota, T.S. & Malhi, S. S. 2012.** Intercropping barley with pea for agronomic and economic considerations in northern Ontario. *Agricultural Sciences*, **3**: 889-895.
- 222.Sanderson, M. A. & Wedin, W. F. 1989.** Phenological stage and herbage quality relationships in temperate grasses and legumes. *Agron. J.*, **81**, pp. 864-869.
- 223. Scehovic, J. 1979.**Prévision de la digestibilité de la matière organique et de la quantité de matière sèche ingérée des graminées, sur la base de leur composition chimique. *Fourrages*, **79**, pp. 57-78.
- 224. Schoeny, A., Jumel, S., Rouault, F., Lemarchand, E.&Tivoli, B., 2010.** Effect and underlying mechanisms of pea-cereal intercropping on the epidemic development of ascochyta blight. *European Journal of Plant Pathology*,**126**, 317–331.
- 225. Scholberg, J.M.S., Dogliotti, S., Zotarelli, L., Cherr, C.M., Leoni, C. & Rossing W.A.H.2010.**Cover Crops in Agrosystems: Innovations and Applications, **In:** E. Lichtfouse (Ed.), Genetic Engineering, Biofertilisation, *Soil Quality & Organic Farming*, Springer.Netherlands. pp. 59-97.
- 226. Seutin, B.,Vancutsem, F. & Bodson, B.2011.** la culture en association de froment et légumineuses. livre Blanc . “*céréale*”. Ulg. Gembloux.Agr-Bio-Tech et CRA-W. **9** :13-18
- 227. Senoussi, S. 2010.** Etude de la disponibilité des aliments de bétails dans les régions sahariennes : cas de la région de Souf. *Revue du chercheur*, **8** : 65-74.

- 228. Singer, J.W., Sauer, T. J., Blaser, B.C., Meek, D.W. 2007.** Radiation use Efficiency in Dual Winter Cereal-Forage Production Systems. *Agron. J.* **99**:1175-1179.
- 227. Sinoquet, H. & Caldwell, R.M. 1995.** Estimation of light capture and partitioning in intercropping systems. **In:** Ecophysiology of tropical intercropping. *Science update*, Paris, INRA Editions, pp. 79-97
- 229. 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.
- 230. Smart, A. J., Schacht, W. H. & Pederson, J. F., 1998.** Underlander D. J & Moser L. E. Prediction of leaf: stem ratio in grasses using near infrared reflectance spectroscopy. *J. range manage*, **51** (4), pp. 447-449.
- 231. Steel, R.G.D. & J.H. Torrie. 1982.** Principles and procedures of statistics. Mc Graw Hill book Co., Inc., NY. 420 pages.
- 232. 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.
- 233. Souidi, Z., Hamimed, A., Donze, F., Seddini, A. & Mederbal, K. 2010.** Estimation de l'évapotranspiration d'un couvert forestier en Algérie par télédétection. *Revue télédétection*, Vol. **9** n°3-4, pp.164-181.
- 234. Sulieman, S., Ha, C.V., Schulze, J. & Tran L.-S.P. 2013.** Growth and nodulation of symbiotic *Medicago truncatula* at different levels of phosphorus availability. *Journal of Experimental Botany*, **64**: 2701-2712.
- 235. Szumigalski, A.R. & Van Acker, R.C. 2008.** Land equivalent ratios, light interception, and water use in intercrops in the presence or absence of in-crop herbicides. *Agronomy Journal*, **100**, 1145-1154.

## T

- 236. Terry, R. A. & Tilley, J. M. A. 1964.** The digestibility of the leaves and stems of perennial ryegrass, cocksfoot, timothy, tall fescue, lucerne and sainfoin, as measured by *in vitro* procedure. *Journal of British Grassland Society*, **19**, pp. 363-372.
- 237. Thiessen Martens, J.R., Hoepfner, J.W. & Entz, M.H. 2001.** Legume cover crops with winter cereals in Southern Manitoba: Establishment, productivity and microclimate effects. *Agronomy Journal*, **93**:1086-1096.
- 238. Thomas, J. R. & Gausmann, H. W. 1977.** Leaf reflectance vs. leaf chlorophyll and carotenoid concentration for eight crops. *Agronomy Journal*, **69**, 799-802.
- 239. Thomsen, M.H. & Hauggaard-Nielsen, H. 2008.** Sustainable bioethanol production combining biorefinery principles using combined raw materials from wheat undersown with clover-grass. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, **35**, 303-311.

- 240. Thorsted, M.D., Olesen, J.E. & Weiner J. 2006.** Above- and below-ground competition between intercropped winter wheat (*Triticum aestivum*) and white clover (*Trifolium repens*). *Journal of Applied Ecology*, **43**:237-245.
- 241. Tilman, D., Cassman, K.G., Matson, P., Naylor, R. & Polasky, S. 2002.** Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 418(6898) pp.671-677.
- 242. Trenbath, B.R. 1983.** The dynamic properties of mixed crops. pp. 265-286. **In:** Frontiers of research in agriculture. Roy, S.K. (Ed.). Calcutta, India: *Indian Statistical Institute*.
- 243. Trenbath, B.R. 1993.** Intercropping for the management of pests and diseases. *Field Crops Research*, **34**:381–405.
- 244. Tsubo, M. & Walker, S. 2004.** Shade effects on *Phaseolus vulgaris* L. intercropped with *Zea mays* L. under well-watered conditions. *Journal of Agronomy and Crop Science*, **190**, 168-176.
- 245. Tsubo, M., Walker, S. & Mukhala, E. 2001.** Comparisons of radiation use efficiency of mono-inter-cropping systems with different row orientations. *Field Crops Research*, **71**(1):17-29.

## U

- 246. Ugherughe, P. O. 1986.** Relationship between digestibility of *Bromus inermis* plant parts. *J. agron. Crop Sci.*, **157**, pp.136-143.

## V

- 247. Vandermeer, J. 1989.** The Ecology of Intercropping. Cambridge University Press. Cambridge, 237p.
- 248. Varlet-Grancher, C., Bonhomme, R. & Sinoquet, H. 1993.** Crop structure and light microclimate. 518 p.
- 249. Vincent, M. 1970.** A manual for the particle study of the root nodule bacteria. IBP handbook n° 15, Blackwell Sci, Public, Oxford, 164p.
- 250. Voisin, A., 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 and soil*, **243**: 31–42.
- 251. Voisin, A-S., Cazenave, A-B., Duc, G. & Salon, C. 2013.** Pea nodule gradients explain C nutrition and depressed growth phenotype of hypernodulating mutants. *Agronomy For Sustainable Development*, **33** (4): 829-838.
- 252. Vriignon-Brenas, S., Celette, F., Amossé, C. & David C. 2016.** Effect of spring fertilization on ecosystem services of organic wheat and clover relay intercrops. *European Journal of Agronomy*, **73**:73-82.

## W

- 253. 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.
- 254. Watson, D.J.** 1947. Comparative physiological studies in the growth of field crops. I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. *Annals of Botany*, **11**, 41-76.
- 255. Willey, R. 1979.** Intercropping -Its importance and research needs. Part 1. Competition and yield advantages. *Field crop abstracts*, **32**, 1-10.
- 256. Willey, R. 1990.** Resource use in intercropping systems. *Agric. Water Manag.*, **17**:215-231.
- 257. Wilson, P. J., Thompson, K. & Hodgson, J. G. 1999.** Specific leaf area and leaf dry matter content as alternative predictors of plant strategies. *New Phytologist*, **143**, pp.155-162.
- 258. Wright, I. J., Reich, P.B. & Westoby, M. 2001.** Strategy shifts in leaf physiology, structure and nutrient content between species of high and low rainfall and high and low nutrient habitats. *Functional Ecology*, **15**, pp. 423-434.

## Y

- 259. Yan, C.J., Song, S.H., Wang, W.B., Miao, S.J., Cao, Y.Q., Wang, C.L. & Zhang, L.J. 2014.** Impacts of fertilization on photosynthesis, growth and yield of two soybean cultivars (*Glycine max* L. Merr.) in NorthEast China. *Legume Research*, **38** (1): 77-84.

## Z

- 260. Zaghouane, F. & Boufenar, O. 2002.** Semences de pré-base et de base de céréales de la période 1994-2003. *Cérealiculture*, **41**: 5-20.
- 261. Zeghida, A. 1987.** Importance des espèces annuelles de médicago dans l'amélioration des pâturages. Séminaire international sur la stratégie générale d'aménagement et de développement de la steppe des zones arides. Tebassa: 53-60.