

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur Et de La Recherche Scientifique



جامعة قاصدي مرباح - ورقلة
UNIVERSITE KASDI MERBAH - OUARGLA

كلية علوم الطبيعة و الحياة
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

قسم العلوم الفلاحية
Département des Sciences Agronomiques



THESE

Présentée pour l'obtention du diplôme de DOCTORAT ès SCIENCES

Domaine: Sciences de la Nature et de la Vie

Filière: Sciences Agronomiques

Spécialité: Sciences Agronomiques

Par: MOUSSAOUALI Bakir

Essai de caractérisation agronomique et perspectives de production fourragère de quelques espèces du genre *Hedysarum* cultivées dans les conditions agro-écologiques du Sahara septentrional algérien (région de Ghardaïa)

Soutenue publiquement le 18/06/2023

Devant le jury composé de:

Président	:	CHELOUFI Hamid	Professeur	Univ. de Ouargla
Directeur de thèse	:	HAMDI AÏSSA Baelhadj	Professeur	Univ. de Ouargla
Examineur	:	KADI Si Ammar	Professeur	Univ. de MMTO
Examineur	:	DERAOUI Naïma	M.C.A	Univ. de Ouargla
Examineur	:	KHENE Bachir	M.C.A	Univ. de Ghardaïa
Examineur	:	ABBAS Khaled	Directeur de recherche	INRA Sétif

Année universitaire : 2022/2023

DÉDICACES

Je dédie ce modeste et précieux travail aux êtres
qui sont pour moi, les gens les plus chers dans ce
monde :

Mes parents, que Dieu Tout-Puissant ait pitié d'eux, les
accorde sa sainte miséricorde et les accueille dans son
vaste paradis,

*"In the memory of my father who taught me that if you have a dream you
should follow it"*

Ma chère femme et mes petits anges enfants,

A mes chers frères et chères sœurs,

A tous mes collègues et amis.

 *Bakir M.*

REMERCIEMENTS

Avant tout, je remercie Mon Dieu le tout puissant pour m'avoir donné la santé, la volonté, le courage, l'aptitude et la patience afin de mener à bien ce modeste travail.

Je tiens à exprimer ma gratitude à tous ceux qui, de près ou de loin, m'ont accompagné et soutenu tout le long de ce travail.

En premier lieu, mes plus sincères remerciements et reconnaissances vont spécialement à mon encadreur **Mr. HAMDİ AİSSA Bealhadj**, *professeur à l'université de Ouargla*, pour la qualité de son encadrement et de m'avoir dirigé et orienté avec ses précieux conseils, et ce malgré ses nombreuses charges et occupations.

Mr. CHELOUFI Hamid, *professeur à l'université de Ouargla*, qui m'a fait l'honneur de présider le jury, et ainsi de juger ce travail.

Mes remerciements s'adressent également à **Mr. KADI Si Ammar**, *professeur à l'université de Mouloud Memari Tizi Ouzou*, et à **Mr. KHENE Bachir**, *maître de conférences "A" à l'université de Ghardaïa*, et **Me. DERAOUİ Naïma**, *maître de conférences "A" à l'université de Ouargla*, et **Mr. ABBAS Khaled**, *Directeur de recherche à l'Institut National de la Recherche Agronomique de Sétif* qui m'ont fait l'honneur en acceptant d'examiner ce travail.

Il m'est agréable d'exprimer mes sincères remerciements aux enseignants et chercheurs de l'université de Ouargla et Ghardaïa et Tizi Ouzou, qui m'ont dirigé, conseillé et encouragé, et aidé à construire l'idée de ce travail. C'est grâce à eux que j'ai fait les principales balises de cette recherche: **Mr Zakaria BOUAL, Noureddine BOURAS...**

J'exprime ma profonde gratitude à **Mr. ABBAS Khaled** pour son aide et sa contribution à l'installation de mes essais, il m'a fourni la première quantité de semences du sulla de sa collecte au niveau de la station INRAA-Sétif. Ainsi au chef du Laboratoire de Biochimie Analytique et Biotechnologies (LABAB) de Tizi-Ouzou: **Mr. KADI Si Ammar** et **Me. Kadi-Bennane**, qui m'ont aidé par des échantillons du matériel biologique (semences) et du sol, pour leur accueil et sympathie. Ainsi, je présente mes sincères remerciements à tout le personnel du labo.

Je n'oublierai jamais de remercier mes frères et collègues **Younes BABAZ** et **Brahim BELADIS** pour leurs collaboration et soutien pour l'apprentissage du fameux logiciel R.

C'est aussi plus qu'un devoir pour moi de reconnaître que j'ai pu bénéficier de l'université de Ouargla, mon port d'attache de plusieurs avantages.

Je tiens aussi à exprimer mes vifs et sincères remerciements à Mr. Salah, Mr. Brahim pour leur disponibilité, leur aide et leur orientation sur le terrain.

 *Bakir*

Résumé

Essai de caractérisation agronomique et perspective de production fourragère de quelques espèces du genre *Hedysarum* cultivées dans les conditions agro-écologiques du Sahara septentrional algérien (région de Ghardaïa)

Le présent travail a été effectué pour évaluer la production fourragère et les traits agronomiques de trois espèces du *Hedysarum*, légumineuses fourragères à double fin agronomique, mises en culture dans une nouvelle zone où elle n'a jamais poussé, en irrigué, dans les conditions agro-écologiques des oasis de la région du M'Zab (nord du Sahara algérien): *Hedysarum carnosum*, *Hedysarum coronarium*, *Hedysarum flexuosum*. Le choix des espèces a été effectué grâce à leur adaptation aux conditions marginales telles que la salinité et la sécheresse.

Plusieurs paramètres fonctionnels, agronomiques et biométriques reflétant le comportement ont été déterminés pour évaluer la productivité fourragère des plantes au stade final de la croissance, à savoir: la hauteur de la plante, nombre des feuilles par plante, nombre des tiges par plante, poids frais des feuilles, poids frais des tiges, rapport feuilles sur tiges (en matière fraîche), biomasse fourragère sèche (t/ha); surface foliaire spécifique (m^2/kg); teneur en matière sèche foliaire (mg/g).

Les résultats obtenus indiquent que ces trois espèces du genre *Hedysarum* peuvent se croître dans la région du M'Zab. *Hedysarum coronarium* a présenté les meilleurs résultats par rapport aux autres espèces à l'exception du rapport feuilles/tiges et SLA (*Hedysarum carnosum* occupe la première place avec 1,44 contre 1,40 et 1,25 et $13,09 \text{ m}^2/\text{kg}$ contre 8,9 et $13,07 \text{ m}^2/\text{kg}$ respectivement).

L'inoculation rhizobiale indirecte a confirmé la possibilité d'avoir des nodules sur les racines des trois espèces, et le sol de Sétif a donné des résultats très intéressants sur le nombre de nodules chez toutes les espèces cultivée (116; 115,3; 105,67 nodules pour *Hedysarum coronarium*, *Hedysarum flexuosum*, *Hedysarum carnosum* respectivement).

La fertilisation azotée a donné des résultats importants sur les paramètres biométriques et les paramètres du rendement. La dose D2 (25 u de N) a enregistré les valeurs les plus élevées chez les trois espèces. Les rendements moyens des trois espèces ont varié de 0,9 à 3,5 t/ha de MS.

Il a été constaté que la composition chimique du matériel végétal des espèces cultivées prouve leur qualité nutritionnelle pour les paramètres évalués. *Hedysarum carnosum* a enregistré une valeur élevée de matière azotée totale de 20,87% par rapport aux autres espèces: 17,43 pour *Hedysarum flexuosum* et 17,19% pour *Hedysarum coronarium*; alors que pour la cellulose brute, *Hedysarum flexuosum* a enregistré la valeur la plus faible (7,76%) qui est la meilleure. Ces espèces contiennent une concentration modérée de flavonoïdes (entre 2 et 4% de MS) qui peut avoir des effets bénéfiques sur le métabolisme des protéines chez les ruminants.

A la sortie de cette étude, une masse importante de résultats ont été obtenus qui encouragent les agriculteurs-éleveurs à introduire ces espèces dans leur système de production pour enrichir le calendrier fourrager et améliorer la production laitière, en évitant les périodes creuses du fourrage vert.

Mots clés: *Hedysarum*, caractéristiques agronomiques, production fourragère, adaptation, Ghardaïa, Algérie.

Abstract

Trial of agronomic characterization and perspective of fodder production of some species of *Hedysarum* cultivated in agro ecological conditions of Algerian northern Sahara (case of Ghardaïa province)

This work is realized in the raison to evaluate fodder production and agronomical traits of three species of *Hedysarum*, leguminous plants with dual-purpose agronomic, cultivated for the first time in agro ecological conditions of M'Zab oases, under irrigation: *Hedysarum carnosum*, *Hedysarum coronarium*, *Hedysarum flexuosum*. The choice of these species is based on their well adaptation to marginal conditions such as salinity and drought.

Several functional, agronomic and biometric traits that reflect the behavior have been determined to assess the forage productivity of plants at the final stage of growth, such as: plant height, leaves number per plant, stems number per plant, weight of fresh leaves, weight of fresh stems, Leaf/stem ratio for fresh weight, dry biomass (t.ha^{-1}); specific leaf area: SLA ($\text{m}^2.\text{kg}^{-1}$) and leaf dry matter content: LDMC (mg.g^{-1}).

The obtained results indicate that *Hedysarum* species can be grown in M'Zab region. *H. coronarium* presented the best results compared with others, except leaf/stem ratio and SLA (*H. carnosum* takes the first place with 1.44 vs. 1.40 and 1.25, and $13.09 \text{ m}^2.\text{kg}^{-1}$ vs. 8.9 and $13.07 \text{ m}^2.\text{kg}^{-1}$ respectively).

Indirect rhizobial inoculation confirmed the possibility to form nodules on the roots of the three species. The soil of Sétif gave very interesting results on the number of root nodules in all cultivated species (116; 115.3; 105.67 nodules for *Hedysarum coronarium*, *Hedysarum flexuosum*, *Hedysarum carnosum* respectively).

Nitrogen fertilization presented important results on biometric and yield parameters. The rate D2 (25 u of N) recorded the very high values on all species. The average yields varied from 0.9 to 3.5 t.ha^{-1} of dry matter.

Chemical composition of cultivated species was found very important and reflects the nutritional quality especially on measured parameters. *Hedysarum carnosum* recorded the high value of crude protein (20.87%) compared with other species: 17.43% for *H. flexuosum* and 17.19% for *H. coronarium*. However, *H. flexuosum* recorded the low value of crude fiber (7.76%) witch is the best nutritionally.

At the end of this study, we obtained a large amount of results and information on crop production of these fodder species. They encourage the farmers to include these valuable cultures in their production system in order to enrich the fodder calendar and avoid the absence of green forage.

Key words: *Hedysarum*, agronomic characteristics, fodder production, adaptation, Ghardaïa, Algeria.

الملخص

اختبار الخصائص الزراعية وآفاق إنتاج العلف لعدة سلالات من نوع *Hedysarum* مزروعة في الظروف الزراعية البيئية لشمال الصحراء الجزائرية (منطقة غرداية)

تم إجراء هذه الدراسة لتقييم الإنتاج العلفي والخصائص الإنتاجية لثلاثة سلالات مختلفة لنبات السولا (*Hedysarum*)، من عائلة العقديات العلفية، التي تتميز بخصائص زراعية متعددة (مدرة للحليب، مرعى للنحل...)، مزروعة في منطقة جديدة لم يتم زرعها فيها من قبل، باستعمال السقي، في الظروف المناخية لواحات غرداية "مزاب" جنوب الجزائر: *Hedysarum coronarium*, *Hedysarum carnosum*, *Hedysarum flexuosum*. كان اختيار هذه السلالات على أساس خصائصها المميزة في التأقلم مع الظروف الصعبة كالملوحة والجفاف.

درسنا في هذه التجارب مجموعة من العوامل الزراعية التي تعكس سلوك النبات قصد الوقوف على إنتاجيته في المرحلة الأخيرة من النمو، وهي على سبيل المثال: طول النبات، عدد الأوراق وعدد السيقان، الوزن الجاف للأوراق والسيقان، نسبة الأوراق على السيقان، الكتلة الحيوية الجافة للأعلاف (طن/هكتار)، المساحة النوعية الورقية (m^2/kg)، محتوى الورقة من المادة الجافة (مغ/غ)...

النتائج المتحصل عليها تشير إلى إمكانية تطور هذه السلالات الثلاث من النباتات في هذه المنطقة. *Hedysarum coronarium* تحصلنا منه على نتائج عالية مقارنة بالسلالات الأخرى، باستثناء نسبة الأوراق إلى السيقان والمساحة النوعية للورقة.

تأكد من خلال الدراسة أن التلقيح الريزوبي غير المباشر يعطي نتائج مهمة جدا في القدرة على تكوين العقد على مستوى جذور النباتات، وأن تربة سطيف أعطت العدد الأكبر من العقد عند السلالات الثلاث المزروعة (116، 115.5، 105.67 عند *Hedysarum coronarium*، *Hedysarum carnosum*، *Hedysarum flexuosum* على الترتيب).

كما أعطى التسميد الأزوتي نتائج مقبولة بالنسبة للمعايير البيومترية ومعايير المردوية. سجل التركيز D2 (25 u de N) القيم العالية عند السلالات الثلاث، وكان متوسط المردود للسلالات الثلاث يتراوح بين 0.9 و 3.5 طن/هكتار من المادة الجافة.

أظهرت التركيبة الكيميائية للمادة الجافة النباتية أن السلالات الثلاث لها قيمة غذائية عالية بالنسبة للحيوانات المنتجة للحليب، فيما يخص المعايير المدروسة. فالسلالة *Hedysarum carnosum* سجلت قيمة عالية من المادة الأزوتية قدرت بـ 20.87% مقارنة بالسلالتين الأخريين: 17.43% بالنسبة لـ *Hedysarum flexuosum* و 17.19% بالنسبة لـ *Hedysarum coronarium*. أما بالنسبة لمادة السيليلوز الخام، *Hedysarum flexuosum* سجلت القيمة الدنيا (7.76%) وهي جيدة من الناحية الغذائية. هذه السلالات تحتوي على تركيز معتدل من مركبات الفلافونويد (بين 2 و 4% من المادة الجافة) التي تؤثر إيجابا على عملية استقلاب البروتينات.

خلصنا في نهاية هذه الدراسة إلى مجموعة معتبرة من النتائج والمعلومات التي يمكن أن تكون حافزا للفلاحين المربين لإدخالها في نظام الإنتاج لديهم وفي الرزنامة العلفية كي يتم تجنب الفترات الخالية من العلف الأخضر (الشتاء خاصة).

الكلمات المفتاحية: *Hedysarum*، الخصائص الزراعية، الإنتاج العلفي، التأقلم، غرداية، الجزائر.

Liste des figures

Figure 1 : <i>Hedysarum coronarium</i> au stade floraison	12
Figure 2 : <i>Hedysarum carnosum</i> au stade début floraison	13
Figure 3 : <i>Hedysarum flexuosum</i> en stade pleine floraison	14
Figure 4 : La fleur du Sulla et la présence de l'abeille <i>Apis mellifera</i>	21
Figure 5 : Localisation des sites d'étude (A: Carte globale de l'Algérie // B: Site de <i>Laadira</i> // C: site de <i>Lintissa</i>)	27
Figure 6 : Exemples des températures (TM et Tm) de la région de Ghardaïa	28
Figure 7 : Exemples des précipitations de la région de Ghardaïa	29
Figure 8 : Exemples de l'humidité relative de la région de Ghardaïa	30
Figure 9 : Diagramme ombro-thermique de Gaussen pour la région de Ghardaïa (2010-2020)	32
Figure 10 : Place de la région de Ghardaïa sur le climagramme d'Emberger (2010-2020)	33
Figure 11 : Test de germination	42
Figure 12 : Préparation des semences et du substrat	42
Figure 13 : Dispositif expérimental adopté	45
Figure 14 : Plan expérimental de l'essai.....	50
Figure 15 : Détails d'un bloc	50
Figure 16 : Préparation des parcelles expérimentales et épandage de engrais	51
Figure 17 : Interface de site utilisé pour l'identification	65
Figure 18 : Mise en culture sur des pots des 3 espèces du sulla dans la serre de l'université de Ghardaïa	66
Figure 19 : Symptômes observés sur les plants du sulla après la levée	66
Figure 20 : Mise en culture des graines du sulla sur un milieu nutritif	67
Figure 21 : Mise en culture des organes végétatifs du sulla sur un milieu nutritif	67
Figure 22 : Evolution des superficies réservées aux cultures fourragères et les productions (2013-2020)	71
Figure 23 : Résultats bruts de l'enquête sur les cultures fourragères dans la région de Ghardaïa	72
Figure 24 : Evolution de la germination des graines pour les 3 écotypes.....	82
Figure 25 : Evolution des paramètres de la germination chez les populations étudiées	84
Figure 26 : Evolution du taux de germination chez les 3 écotypes du sulla dans la région de Ghardaïa	85
Figure 27 : Evolution de taux de germination et du taux de variation chez les 3 écotypes du sulla	86
Figure 28 : Variation de l'ITG et TMG des semences des 3 écotypes du sulla.....	87
Figure 29 : Nombre des feuilles et des ramifications par plante pour les espèces de <i>Hedysarum</i>	96
Figure 30 : Boîtes à moustache du poids frais des feuilles et des tiges pour les 3 espèces du sulla,	97
Figure 31 : Boîtes à moustaches du rapport feuilles sur tiges des 3 espèces étudiées du sulla	98
Figure 32 : Boîtes à moustache du rendement en fourrage sec (t/ha) des espèces étudiées	99
Figure 33 : Boîtes à moustache présentant la différence entre les espèces du Sulla en SLA	102
Figure 34 : Boîtes à moustache présentant la différence entre les espèces du sulla en LDMC	103
Figure 35 : Relation entre les indices fonctionnels : SLA et LDMC	104
Figure 36 : Corrélogramme entre tous les paramètres mesurés des 3 espèces étudiées de <i>Hedysarum</i>	106
Figure 37 : Schéma illustrant l'importance de l'ajustement des apports azotés	109
Figure 38 : Histogramme illustrant la variation des paramètres morphologiques	111
Figure 39 : Box plot de la hauteur des plantes par rapport aux doses d'azote	113
Figure 40 : Box plot du nombre des feuilles par plante en fonction des doses d'azote	115
Figure 41 : Box plot du nombre de ramification par plante en fonction des doses d'azote	117
Figure 42 : Box plot du poids frais des feuilles et des tiges en fonction des doses d'azote	120
Figure 43 : Box plot spécifique au rapport des feuilles sur tiges en fonction des doses d'azote	122
Figure 44 : Histogramme illustrant la variation des paramtres du rendement.....	125
Figure 45 : Box plot présentant la biomasse sèche en fonction des doses d'azote	127

Figure 46 : Box plot du rendement en matière sèche par hectare en fonction des doses d'azote	129
Figure 47 : Box plot du taux de matière sèche en fonction des doses d'azote	132
Figure 48 : Histogramme illustrant la variation des paramètres de la reproduction.....	134
Figure 49 : Histogramme illustrant la variation des paramètres de la reproduction.....	134
Figure 50 : Box plot du nombre de gousses par plante en fonction des doses d'azote	136
Figure 51 : Corrélation multiple entre les paramètres de la reproduction.....	140
Figure 52 : Corrélation multiple entre les paramètres morphologiques	142
Figure 53 : Corrélation multiple entre les paramètres de rendement	142
Figure 54 : Nombre de nodules formés sur les systèmes racinaires des plantes cultivées	144
Figure 55 : Nombre de nodules formés au niveau des racines des plantes.....	145
Figure 56 : Effet d'inoculation rhizobial indirecte sur le nombre des nodules	148
Figure 57 : Différentes formes de nodosités chez les légumineuses	150
Figure 58 : Teneur en matière azotée totale MAT et en cellulose brute CB des 3 espèces du sulla	154
Figure 59 : Teneurs en Polyphénols et Flavonoïdes chez les espèces de sulla.....	156
Figure 60 : Répartition des ordres recensés et pourcentage des individus capturés	160
Figure 61 : Signes d'attaque de la culture du sulla par des insectes	161
Figure 62 : individus du genre <i>Aphis</i>	162
Figure 63 : Adulte de <i>Bruchidius imbricornis</i>	163
Figure 64 : Symptômes observés chez les plantules du sulla après le semis	164
Figure 65 : Chute des fleurs du sulla (A: fanaison des fleurs ; B: stade avancé de la chute des fleurs)	166
Figure 66 : Lésions sur racines de <i>H. coronarium</i> causées par le champignon <i>Rhizoctonia solani</i>	167
Figure 67 : Observation microscopique de <i>Fusarium</i> sur les racines	169

Liste des tableaux

Tableau 1 : Composition chimique de sulla.....	15
Tableau 2 : Principaux paramètres nutritives du Sulla en comparaison avec 2 autres espèces	15
Tableau 3 : Composition chimique de sulla (<i>Hedysarum carnosum</i>)	17
Tableau 4 : composition chimique de <i>Hedysarum flexuosum</i> , plante entière (g/kg de MS):.....	18
Tableau 5 : Températures mensuelles de la wilaya de Ghardaïa (2010/2020)	28
Tableau 6 : Moyenne mensuelle de la pluviométrie de la wilaya de Ghardaïa (2010/2020)	29
Tableau 7 : Humidité relative mensuelle de l'air de la wilaya de Ghardaïa (2010/2020).....	30
Tableau 8 : Durée moyenne d'insolation en heures dans la wilaya de Ghardaïa (2010/2020)	31
Tableau 9 : les exploitations enquêtées dans la wilaya par commune	38
Tableau 10 : Dispositif expérimental adopté	57
Tableau 11 : Caractéristiques culturales des 3 écotypes du sulla comparés avec deux études antérieures ..	88
Tableau 12 : Evolution du nombre des plants en croissance des 3 espèces du sulla	91
Tableau 13 : Caractéristiques culturales des 3 espèces du <i>Hedysarum</i> cultivées dans la région de Ghardaïa	92
Tableau 14 : Comparaisons multiples de Tukey de la hauteur des plantes cultivées du sulla.....	95
Tableau 15 : Valeurs de SLA enregistrées entre les trois espèces cultivées de <i>Hedysarum</i> (m ² /kg).....	101
Tableau 16 : Niveau de différence des valeurs de la SLA entre les espèces cultivées	102
Tableau 17 : Coefficients de corrélation entre les paramètres des espèces étudiées au seuil de 5%.....	105
Tableau 18 : Coefficients de corrélation entre les paramètres étudiés de l'espèce <i>H. coronarium</i>	106
Tableau 19 : Coefficients de corrélation entre les paramètres étudiés de l'espèce <i>H. flexuosum</i>	107
Tableau 20 : Coefficients de corrélation entre les paramètres étudiés de l'espèce <i>H. carnosum</i>	107
Tableau 21 : Valeurs moyennes des différents paramètres morphologiques entre doses et populations ..	110

Tableau 22 : Résultats du test de normalité pour tous les paramètres morphologiques	112
Tableau 23 : Niveau de différence de la hauteur des plantes entre les doses d'azote appliquées	113
Tableau 24 : Tableau de l'analyse de la variance de la hauteur des plantes en fonction des traitements ...	114
Tableau 25 : Comparaisons multiples des moyenne de Tukey	114
Tableau 26 : Niveau de différence du nombre de feuilles par plante entre les doses d'azote appliquées ...	115
Tableau 27 : Tableau de l'analyse de la variance du nombre des feuilles en fonction des traitements	116
Tableau 28 : Comparaisons multiples des moyenne de Tukey	116
Tableau 29 : Niveau de différence du nombre de ramification par plante entre les doses d'azote	118
Tableau 30 : Tableau de l'analyse de la variance du nombre de ramifications en fonction des traitements	118
Tableau 31 : Comparaisons multiples des moyenne de Tukey	119
Tableau 32 : Niveau de différence des paramètres poids frais des tiges et feuilles entre les doses d'azote	120
Tableau 33 : Tableau de l'analyse de la variance du poids frais des feuilles en fonction des traitements ...	121
Tableau 34 : Tableau de l'analyse de la variance du poids frais des tiges en fonction des traitements	121
Tableau 35 : Niveau de différence du rapport feuilles sur tiges entre les doses d'azote appliquées.....	122
Tableau 36 : Tableau de l'analyse de la variance du rapport feuilles sur tiges en fonction des traitements	123
Tableau 37 : Comparaisons multiples des moyennes de Tukey	123
Tableau 38 : Valeurs moyennes des différentes variables mesurées du rendement entre doses et populations	124
Tableau 39 : Résultats du test de normalité pour tous les paramètres du rendement	126
Tableau 40 : Niveau de différence de la biomasse sèche entre les doses d'azote appliquées	127
Tableau 41 : Tableau de l'analyse de la variance de la biomasse sèche en fonction des traitements	128
Tableau 42 : Comparaisons multiples des moyennes de Tukey	128
Tableau 43 : Niveau de différence du rendement en MS (t/ha) entre les doses d'azote appliquées.....	130
Tableau 44 : Tableau de l'analyse de la variance du rendement en MS (t/ha) en fonction des traitements	130
Tableau 45 : Comparaisons multiples des moyennes de Tukey	131
Tableau 46 : Valeurs moyennes des différents paramètres mesurés de la reproduction entre doses et populations	133
Tableau 47 : Résultats du test de normalité pour tous les paramètres de reproduction	135
Tableau 48 : Niveau de différence du nombre de gousses par plante entre les doses d'azote appliquées..	137
Tableau 49 : Tableau de l'analyse de la variance du nombre d'articles par gousse en fonction des traitements	138
Tableau 50 : Comparaisons multiples des moyennes de Tukey	138
Tableau 51 : Tableau de l'analyse de la variance du nombre des nodules en fonction des espèces et des sols .	148
Tableau 52 : Comparaisons multiples des moyennes de Tukey (Facteur : Espèces)	149
Tableau 53 : Comparaisons multiples des moyennes de Tukey (Facteur : Types du sol).....	149
Tableau 54 : Valeurs moyennes ($\pm$ DS) des polyphénols et des flavonoïdes chez les 3 espèces du sulla	157
Tableau 55 : Listes des ordres et des familles rencontrées dans les parcelles	159

Contenu

REMERCIEMENTS

RESUME / ABSTRACT / ملخص

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

INTRODUCTION GENERALE.....1

OBJECTIF de l'étude4

PARTIE 01 : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

Les légumineuses.....7

Genre Hedysarum.....9

Bref aperçu sur les trois espèces étudiées de Sulla : Matériel biologique utilisé.....11

1.Description et systématique 11

1.1. *Hedysarum coronarium* 11

1.2. *Hedysarum carnosum*..... 12

1.3. *Hedysarum flexuosum* 13

2.Valeur fourragère (potentiel fourrager) et caractéristiques agronomiques 14

2.1. *Hedysarum coronarium* 14

2.2. *Hedysarum carnosum*..... 16

2.3. *Hedysarum flexuosum* 17

3.Ecologie et exigences environnementaux des sullas 18

4.Intérêts agronomiques des sullas 19

- Amélioration de la fertilité du sol 19

- Alimentation du bétail 19

- Fixation biologique de l'azote atmosphérique 20

- Production du miel 20

Associations symbiotiques des légumineuses : potentialités et production22

A / Association espèce végétale et une souche bactérienne : Sulla et rhizobium 22

B / Association espèce végétale et un champignon symbiotique: Sulla et Mycorhize 23

PARTIE 02 : MATERIEL ET METHODES

Chapitre 1. Présentation de la région d'étude (Ghardaïa).....26

I.1. Objectif, zone et la période de l'étude 26

I.2. Description de la zone d'étude (situation géo-édapho-climatique)..... 26

I.3. Caractéristiques agronomiques et écologiques de la région 34

I-3-1- Couvert végétal et agriculture 34

I-3-2- Production agricole de la wilaya de Ghardaïa 35

Chapitre 2. Enquête sur les cultures fourragères dans la région d'étude.....	37
2.1. Enquête sur la pratique des cultures fourragères dans les systèmes de production agricole de la région.....	37
2.1.1. Introduction	37
2.1.2. Objectifs de l'enquête	37
2.1.3. Identification et choix des zones enquêtées	38
2.1.4. Traitement statistique des données de l'enquête	39
2.2. Enquête sur les maladies des cultures fourragères et les produits phytosanitaires utilisés pour la lutte	39
2.2.1. Introduction	39
2.2.2. Objectifs de l'enquête	40
2.2.3. Identification et choix des zones enquêtées	40
2.2.4. Traitement statistique des données de l'enquête	40
Chapitre 3. Installation et déroulement des essais expérimentaux.....	41
3.1. Comparaison de la germination, de la croissance et de développement de 3 écotypes différents du Sulla (<i>Hedysarum coronarium</i>)	41
3.1.1. Objectif et choix des écotypes.....	41
3.1.2. Prospection et collecte des semences; protocole expérimental.....	41
3.1.3. Paramètres mesurés pour la germination	42
3.1.4. Traitement statistique des données	44
3.2. Comparaison de la production herbagère et fourragère de trois espèces de <i>Hedysarum</i>	44
3.2.1. Objectif de l'essai et du choix des espèces	44
3.2.2. Prospection et recherche des semences	44
3.2.3. Lieu de l'essai et dispositif expérimental	45
3.2.4. Caractérisation agronomique du sulla cultivé (paramètres à mesurer).....	46
3.2.5. Traitement statistique des données	48
3.3. Identification des besoins en nutrition minérale (fertilisation azotée)	48
3.3.1. Introduction.....	48
3.3.2. Objectif de l'essai	49
3.3.3. Plan expérimental	49
3.3.4. Caractérisation agronomique du sulla cultivé (paramètres mesurés)	54
3.3.5. Traitement statistique des données	55
3.4. Essai d'inoculation des plantes du sulla et conduite de la culture (en hors sol): inoculation indirecte	55
3.4.1. Introduction.....	55
3.4.2. Objectif de l'inoculation.....	55
3.4.3. Méthode adoptée et protocole expérimental	56
3.4.4. Traitement statistique des données	57

3.5. Contribution à l'étude de la composition chimique des espèces fourragères cultivées du sulla	58
3.5.1. Introduction.....	58
3.5.2. Objectif de l'étude.....	59
3.5.3. Analyses biochimiques et fourragères effectuées	59
3.6. Inventaire de l'entomofaune associée et des maladies observées sur la culture du sulla	63
3.6.1. Introduction.....	63
3.6.2. Objectif de l'étude.....	63
3.6.3. Protocole expérimental // démarche suivie	63
3.6.4. Traitement des individus capturés.....	64
3.6.5. Détermination des espèces capturées	64
3.6.6. Détermination des maladies attaquant le sulla cultivé dans la région	65

PARTIE 03 : RESULTATS ET DISCUSSION

Chapitre 1. Résultats d'enquêtes70

I. Situation des fourrages cultivés dans la région de Ghardaïa.....70

I.1. Spéculations (cultures) pratiquées et superficies réservées aux fourrages dans les exploitations	70
I.2. Espèces fourragères cultivées.....	72
I.3. Utilisation des engrais.....	73
I.4. Type de produit final (vert, ensilage, ...)	74

II. Maladies des cultures fourragères de la région et les produits phytosanitaires utilisés....75

II.1. Principales maladies et ravageurs rencontrés dans les cultures fourragères et les dégâts occasionnés sur les plantes.....	75
II.2. Produits phytosanitaires utilisés et modes d'emploi.....	78

Chapitre 2. Caractéristiques agronomiques de sulla cultivé et identification des exigences culturales81

2.1. Comparaison de la germination, de la croissance et de développement de 3 écotypes différents du Sulla (<i>Hedysarum coronarium</i>)	81
2.1.1. La germination	81
2.1.2. La croissance et le développement.....	87
Conclusion	89
2.2. Comparaison de la production herbagère et fourragère de trois espèces de <i>Hedysarum</i>	90
2.2.1. Critères et principes du choix des espèces	90
2.2.2. Evaluation de la germination des 3 espèces du sulla	91
2.2.3. Evaluation de la croissance et de développement des 3 espèces du sulla.....	91
2.2.4. Evaluation de la qualité et de la production fourragère des paramètres agronomiques	94
Conclusion	108
2.3. Identification des besoins en nutrition minérale (fertilisation azotée)	109

2.3.1. Evaluation des paramètres morphologiques	110
2.3.2. Evaluation des paramètres du rendement	124
2.3.3. Evaluation des paramètres de reproduction	132
Conclusion	142
2.4. Essai d'inoculation des plantes du sulla en hors sol : inoculation indirecte.....	143
2.4.1. Evaluation du nombre de nodules en fonction des espèces du sulla	144
2.4.2 Evaluation du nombre des nodules en fonction des types du sol	144
2.4.3. Analyse statistique des données	146
Conclusion	152
2.5. Contribution à l'étude de la composition chimique des espèces fourragères cultivées du sulla.....	153
2.5.1. Matière azoté totale (MAT) ou protéine brute	155
2.5.2. Cellulose brute (CB)	157
2.5.3. Polyphénols et flavonoïdes.....	158
Conclusion	159
2.6. Inventaire préliminaire de l'entomofaune et des maladies de la culture du sulla introduite dans la région	158
2.6.1. Description préliminaire de l'entomofaune associé à la culture du sulla	158
Discussion.....	162
2.6.2. Description préliminaire des principales maladies affectant la culture du sulla.....	164
Discussion.....	166
Conclusion	170
CONCLUSION GENERALE et PERSPECTIVES	171
PERSPECTIVES	176
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	178

INTRODUCTION

GÉNÉRALE

Introduction générale

La production fourragère joue un rôle primordial dans le secteur agricole tant en Algérie, qu'en Afrique ou dans le monde entier. Elle est en effet le principal levier de l'amélioration de l'alimentation des animaux d'élevage de toute sorte (Klein *et al.*, 2014) d'un côté, et d'autre côté, elle est pratiquée pour protéger le sol contre l'érosion, remplacer le travail mécanique du sol, apporter de la fumure organique et enrichir le sol en azote au biais de la fixation symbiotique, si les espèces cultivées sont des légumineuses (Klein, 1999). Donc elle joue un rôle central dans le développement durable des systèmes de production qui prévoient le jumelage des deux systèmes "animal - végétal".

Dans les exploitations d'élevage, soit bovin ou ovin, les productions fourragères et les systèmes fourragers sont considérés comme un maillon essentiel des systèmes d'élevage. C'est un facteur qui détermine la performance économique et environnementale de l'exploitation (Vignau-Loustau et Huyghe, 2008). Cependant, en Algérie, la qualité médiocre des espèces herbagères naturelles et permanentes souvent très cellulosique, l'absence de fourrage vert en quantités suffisantes pendant de longues périodes de l'année et les contraintes climatiques influent négativement sur le rendement de l'élevage (Medjebeur *et al.*, 2018).

Les cultures fourragères contribuent au réaménagement des zones marginales, surtout en cas d'une mise en valeur. Elles permettent, en cas d'un bon itinéraire, aux agriculteurs de pratiquer toutes autres activités agricoles dans les systèmes d'exploitation, comme l'élevage, les cultures intensives... car elles nécessitent tout d'abord une source d'eau et une conduite rigoureuse. C'est le maillon principal d'une agriculture moderne et d'un développement durable.

En Algérie, les cultures fourragères occupent une place marginale dans les systèmes de production agricole (Abdelguerfi et Laouar, 2003). La situation des fourrages est fluctuante d'une année à l'autre, soit sur le plan des superficies emblavées et les rendements obtenus, soit sur le plan des espèces fourragères utilisées et les ressources naturelles exploitées, ou sur le plan de la qualité physico-chimique des sols destinés à la pratique de l'agriculture.

La grande partie de la superficie totale du pays (environ 70%) se trouve dans les régions arides et hyper-arides, avec des sols calcaires et alcalins-salins, où la biodisponibilité du phosphore et d'autres oligo-éléments est faible, posant un problème majeur pour la croissance des plantes et en termes de rendements des cultures.

Les superficies cultivées par les fourrages sont en fluctuation d'une année à l'autre, suite à un ensemble de causes telle que le morcellement des parcelles et l'orientation des gens vers l'industrie et

Introduction générale

le commerce. Actuellement, les superficies réservées aux fourrages sont de l'ordre de 1 233 422 ha, entre fourrages naturels et fourrages artificiels, soit 2,80% de la SAT et 14,40% de la SAU (MADR, 2019). La superficie emblavée par les fourrages artificiels représente 77,82%. Ces valeurs sont supérieures que celles de la 2^{ème} décennie de ce siècle, elles ont représenté 1,83% de la SAT et 2,6 % de la SAU (Senoussi et Behir, 2010 ; Zirmi-Zembri et Kadi, 2016). Cela revient probablement aux subventions destinées à ce type de culture dans le cadre des plans du développement de l'état.

Ajoutons que l'espèce fourragère la plus cultivée est la luzerne (*Medicago sativa* L.) dans la quasi-totalité des systèmes de production. Tous les types de fourrages réunis atteignent une quantité de production, jugée insuffisante, de 61.579.909 q (soit un rendement de 43,8 q/ha) (MADR, 2019), qui couvrent à peine 5% des besoins de notre cheptel qui comprend plus de 36,5 millions de têtes (bovins, ovins, caprins, camelins) qui a connu un taux d'accroissement de 37% entre 2010 et 2020 : 1 786 351 bovins, 29 378 561 ovins, 4 929 069 caprins, 417 167 camelins et 49 911 équins (MADR, 2019). Ces effectifs ont connu des fluctuations entre les années (pas de valeurs stables).

Cette situation réelle de production en matière de fourrages est considérée comme un frein du progrès et de développement de l'élevage algérien. Elle revient essentiellement, selon Abdelguerfi et Laouar (2003), à la non-maitrise du choix, de la conduite et l'exploitation des cultures fourragères. Ainsi, l'ignorance des praticiens (agriculteur-éleveurs) de la diversification de ces cultures, des modes de conditionnement et de conservation (ensilage, foin...), ainsi l'inorganisation des productions semencières fourragères a conduit à ces situations inquiétantes (Ben Jeddi, 2005).

L'élevage algérien est connu, jusqu'à l'heure actuelle, par un aspect traditionnel basé sur le nomadisme et l'exploitation des ressources naturelles telles que les parcours, les steppes et les jachères pâturées ou fauchées (Hamrit, 1995; Abdelguerfi, 2002). L'élevage de type extensif est basé sur les pâturages naturels.

Selon Hamrit (1995) et Abdelguerfi et Laouar (2003), la remédiation et l'amélioration de cette situation est fortement possible. Ils ont proposé un certain nombre de solutions: amélioration de l'itinéraire technique, diversification des espèces cultivées, augmentation des rendements des cultures actuelles, extension des superficies emblavées en fourrages, introduction des nouvelles espèces végétales. Pour améliorer l'utilisation des terres agricoles et offrir de meilleures perspectives aux agriculteurs, il est nécessaire de sélectionner des cultures tolérantes adaptées à ces sols pauvres.

Parmi les espèces les plus intéressantes, sur le plan écologique, agronomique et fonctionnel, le Sulla (*Hedysarum coronarium* L.), qui a prouvé une adaptation et une élasticité importante dans

Introduction générale

les environnements marginaux et aux différentes conditions édapho-climatiques, surtout la sécheresse (Slim, 2011). Cette espèce n'est pas valorisée par les agricultures même dans ses endroits natifs.

Ces divers inconvénients d'ordre technique, écologique et socio-économique aboutissent à poser des questions et des hypothèses afin de chercher des alternatives et des solutions pour ces troupeaux d'animaux d'élevage en ce qui concerne leur alimentation fourragère par l'intégration des nouvelles espèces adaptées à la région, sans mettre à l'écart les espèces et les écotypes locaux ancestraux.

OBJECTIF de l'étude

Tenant compte de la situation fourragère du pays et de la région de Ghardaïa d'une part, et des cultures fourragères qui sont considérées des secteurs indispensables à l'agriculture et aux élevages dans tous les systèmes de production agricole d'autre part, l'introduction des nouvelles espèces fourragères dans nos systèmes de production a pour principal objectif d'améliorer et d'accroître la production animale principalement en viande et en lait.

L'objectif visé de notre travail est de chercher les caractéristiques agronomiques et herbagères et identifier les exigences culturales de trois espèces du *Sulla*: *Hedysarum coronarium*, *Hedysarum carnosum*, *Hedysarum flexuosum*, installées dans les conditions du sud algérien en irrigué, après que nous avons examiné et conclu l'adaptation du *Hedysarum coronarium* dans ce milieu dans une étude antérieure effectuée sur le terrain (magister 2014). Sachant que la seule espèce cultivées de la famille des légumineuses dans la région est la luzerne (*Medicago sativa*) qui est connue par sa période de dormance qui s'étale durant toute la période hivernale (décembre – mars). Cette période creuse est caractérisée par l'absence des espèces fourragères de qualité, où les agriculteurs utilisent des graminées qui ont une teneur faible en protéines. Les espèces du *Hedysarum* ont une période de pleine activité en hiver (décembre à avril). Donc, on peut les considérer comme des espèces qui peuvent substituer la luzerne dans cette période.

Selon Kishinevsky *et al.* (2003), l'intérêt argo-économique des espèces de ce genre réside dans la valeur fourragère dans plusieurs étages bioclimatiques surtout sous les conditions du climat aride et semi-aride. Par la suite, il y a lieu d'encourager la culture de ces espèces (surtout *Hedysarum coronarium*) qui serait d'un grand secours pour l'élevage algérien en raison de son rendement et de sa résistance à la sécheresse et à la chaleur (Julien, 1894 *cité par* Abdelguerfi-Berrekia *et al.*, 1991). Notons que la distribution florale de l'*Hedysarum coronarium* L. et des autres espèces de ce genre selon un spectre bioclimatique très étendu prouve sa rusticité et sa souplesse d'adaptation. Cette diversité phytogénétique est d'un grand intérêt pour les programmes de l'amélioration végétale (Ben Jeddi, 2005) et de la production fourragère et animale par conséquence.

Le nombre important d'études réalisées sur *Hedysarum coronarium* ont également noté une variabilité intéressante des réponses vis-à-vis des contraintes hydriques et de salinité (Ben Jeddi, 2005 ; Issolah et Yahiaoui, 2008 ; Slim, 2011 ; Tibaoui *et al.*, 2018 ; Zirmi-Zembri et Kadi, 2020). L'exploitation de cette diversité génotypique des espèces dans le but d'identifier les caractères de tolérance aux contraintes environnementales constitue, pour l'Algérie, un défi à la production agricole et à la valorisation des zones marginales (Medjebeur *et al.*, 2018).

Introduction générale

Selon Abdelguerfi (2014 et 2018, *comm. person.*), il y a lieu de cultiver et développer une autre espèce du genre *Hedysarum* dans les régions du sud, c'est *Hedysarum carnosum*, qui est une espèce très appréciée par les chèvres, très fréquentée par les abeilles et résistante à la salinité. Les tunisiens (du Sud) ont beaucoup travaillé sur cette espèce qu'ils l'appellent le **Sulla de Sousse**.

L'exploitation de cette diversité génotypique et écologique des espèces conduit à une production agricole et fourragère performante, vu les caractères de tolérance aux contraintes environnementales; ainsi, elle peut contribuer à la valorisation des zones marginales dans le but de créer des zones productives (Medjebeur *et al.*, 2018).

Les travaux expérimentaux réalisés en Algérie confirment les caractéristiques fonctionnelles, adaptatives, agronomiques et nutritives importantes de *Hedysarum flexuosum*; qui peut-être cultivée dans les zones arides (Kadi, 2020, *comm. person.*).

Selon Benhizia *et al.* (2020), quelques espèces du genre *Hedysarum* représentent une ressource agro-économique très importante grâce à leur qualité fourragère et leur capacité d'améliorer la fertilité des sols qu'elles occupent. Ils ont ainsi annoncé que seulement trois espèces spontanées de ce genre sont utilisées comme une source fourragère : *H. flexuosum* L., *H. coronarium* L. et *H. carnosum* Desf (Benhizia *et al.*, 2020).

Ces trois espèces d'intérêt agronomique ont retenu notre attention grâce à leur qualité fourragère, leur adaptation aux conditions marginales et leur capacité à améliorer la fertilité des sols par fixation de l'azote atmosphérique, peuvent être exploitées dans la valorisation des régions dégradées, surtout dans les zones arides et semi-arides.

Dans cette étude, nous allons évaluer l'adaptation, les caractères agronomiques et discuter les perspectives de production fourragère de ces espèces fourragères dans une zone du Sahara septentrional de l'Algérie, cas de la région de Ghardaïa (M'Zab).

Ce travail de recherche est élaboré en trois grandes parties:

- Partie 1: Analyse bibliographique;
- Partie 2: Présentation du matériel et méthodes utilisées lors de l'expérimentation; et
- Partie 3: Résultats et discussion.

Une **introduction générale**, initie le travail et donne une idée générale sur le sujet. Dans laquelle, nous avons donné un aperçu sur les statistiques agricoles algériennes en ce qui concerne les productions fourragères et les effectifs du cheptel dans le pays, pour arriver à dire qu'il y a une nécessité importante et urgente à une production fourragère de qualité couvrant toute l'année.

Introduction générale

Une première partie, ***synthèse bibliographique***, qui va cerner le sujet. Nous documenterons d'abord les éléments biologiques, physiologiques et botaniques des espèces choisies (le Sulla); puis présenter les exigences culturales et les traits agronomiques. Seront présentées en suite, les concepts de la symbiose "Légumineuse-Rhizobium", la nodulation et ses conditions et, en fin, les méthodes de l'inoculation du Sulla.

Une deuxième partie, ***matériel et méthodes***, consiste à donner tous les détails qui concernent l'expérimentation: description et caractérisation de la wilaya de Ghardaïa : en donnant un bref aperçu sur le relief, le climat, les potentialités agricoles, les productions végétales et notamment fourragères et de tous les facteurs accompagnants la culture (climatiques et édaphique). Nous avons, ainsi, présenté toutes les méthodes expérimentales adoptées dans notre étude.

Une troisième partie, ***résultats et discussion***, pour présenter les principaux résultats obtenus durant notre expérimentation, les discuter et les interpréter.

Et en fin, nous allons clôturer par une ***conclusion générale*** qui résume tout le travail, en précisant l'aspect socio-économique de ce sujet et de cette pratique culturale sur le développement durable et la création de la richesse dans nos systèmes de culture surtout le système oasien ; et ainsi proposer des perspectives qui doivent être poursuivies dans des travaux ultérieurs.

Partie I

REVUE

BIBLIOGRAPHIQUE

Aperçu sur les légumineuses et le sulla

Les productions fourragères occupent une place marginale dans les systèmes de productions agricoles en Algérie. Cela revient essentiellement aux faibles superficies réservées à ces cultures et à la diversité insuffisante des espèces. Les sous-produits céréaliers (chaumes et ...) à faible qualité nutritive sont largement utilisés dans l'alimentation du cheptel, rendent le secteur lait improductif. D'autres familles botaniques sont plus intéressantes pour offrir des espèces fourragères de qualité:

Les légumineuses

Les *Fabaceae*, communément appelés légumineuses, représentent la troisième plus grande famille des angiospermes, avec approximativement 730 genres et plus de 18 000 espèces végétales réparties dans le monde entier (Sprent, 1995; Young, 2003; Wojciechowski *et al.*, 2004; Cronk *et al.*, 2006; Briat et Job, 2017). On peut les trouver dans presque tous les biomes naturels, des forêts tropicales jusqu'aux déserts (Cardoso *et al.*, 2012). Les *Fabaceae* comprennent trois grandes sous-familles : les *Caesalpinoideae*, les *Mimosoideae*, les *Papilionoideae* (Sprent, 1995). Ces trois sous-familles ont reçu une attention particulière parce qu'ils peuvent établir des symbioses spécifiques avec les rhizobiums du sol (Shamseldin *et al.*, 2017).

La famille des *Fabaceae* présente un niveau élevé de la diversité d'espèces et de succès évolutifs dans le monde entier (Liu *et al.*, 2017). Les espèces, constituant cette famille, varient entre les herbes annuelles, les arbustes et les arbres géants suivant les étages bioclimatiques où elles se développent.

Les légumineuses fourragères constituent des leviers importants au service d'une agriculture durable tant en grandes cultures qu'en élevage. Du point de vue agro-économique, cette famille est jugée intéressante de point de vue la richesse des grains de leur espèces en amidon et en protéines, et la plupart sont cultivées comme fourrage destiné à l'alimentation de bétail, tels que le bersim, la luzerne, etc. (Salhi, 2008).

Les plantes fourragères sont considérées un élément essentiel du développement économique et environnemental durable du secteur agricole. Elles jouent un rôle déterminant dans le domaine émergent de la bio-économie, et constituent la base du développement de la filière des productions animales (Tibaoui *et al.*, 2011).

Selon Cardoso *et al.* (2012), les légumineuses présentent un intérêt économique, agricole et écologique le plus important parmi tous les angiospermes. Elles sont valorisées et destinées à

l'utilisation comme aliment, huiles, colorants, carburants, médicaments, horticulture; et jouent un rôle fondamental dans le cycle biogéochimique par la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique au biais de la nodulation et l'activité de rhizobium, en produisant des quantités énormes d'azote biologique (Young, 2003). Outre cette association symbiotique bactérienne, les études confirment que les légumineuses peuvent établir des associations de symbiose avec des champignons, dites mycorhiziennes (Young, 2003; Briat et Job, 2017). A l'état spontané, les espèces végétales les plus performantes à cette association aux mycorhizes sont les arbustives, en favorisant l'enrichissement de la surface du substrat en matière organique (Brunel *et al.*, 2007). Ces espèces sont considérées des sources de fertilisation organiques et biologique, et des bonnes têtes de rotation en agriculture.

La caractéristique d'adaptation des légumineuses à des situations climatiques variables et imprévisibles dans les habitats arides et semi-arides revient essentiellement à un métabolisme spécifique permet de produire des feuilles à trait économique et opportuniste (McKey, 1994; Wojciechowski *et al.*, 2004).

En Algérie, la production fourragère est fluctuante et strictement limitée par les conditions climatiques. Les précipitations irrégulières et insuffisantes rendent cette activité difficile. Elle est conduite sur environ 33 millions d'hectares répartis entre les prairies naturelles, les pacages et les parcours, la jachère et les cultures fourragères (1,6%) (Nedjraoui, 2003). Les cultures fourragères pratiquées sont conduites très peu intensives d'une part, et d'autre part très faiblement diversifiées. Elles sont conduites dans le nord du pays en sec (pluvial, sans irrigation), alors que dans les zones arides et sahariennes elles sont cultivées sous pivots en irrigation abondante. Ces sols qui sont pauvres à un ou plusieurs éléments minéraux qui sont essentiels pour la croissance des plantes et le rendement, donc une fertilisation additionnelle est plus que nécessaire pour garantir une production maximale. En plus, les espèces cultivées dans ces zones sont limitées surtout à la luzerne (variété locale et variété américaine).

Genre *Hedysarum*

Le genre *Hedysarum* est classé dans l'ordre des Fabales, la famille des *Fabaceae*, tribu des Hédysarées. *Hedysarum* vient du mot grec *Hedys*, qui signifie ‘‘Fourrage doux à brouter’’ (Bonnier, 1934 cité par Abdelguerfi, 2002). Ainsi, il appartient à la sous-famille des *Papilionoideae* (regroupe environ 440 genres) qui renferme 97% des espèces susceptibles à la nodulation (Sprent, 1995). Ces *Papilionoideae* sont divisées en deux groupes d'espèces : pour la production des graines alimentaires tels que le pois, le haricot, le soja... et pour la production des fourrages tels que la luzerne, le trèfle violet et le sulla (*Hedysarum coronarium*) (Fitouri, 2011).

Il se trouve dans le monde entier, à l'état spontané, et on peut recenser environ 300 espèces de ce genre réparties à travers l'Europe tempérée, la région méditerranéenne de l'Afrique du nord, l'ouest de l'Asie, la Sibérie et voire même l'Amérique du Nord (Issolah, 2012; Liu *et al.*, 2017). Les espèces de ce genre peuvent être observées dans différents habitats et biotopes, en alpine et dans les prairies arctiques, les pelouses pierreuses, les déserts et les bords de mers (Choi et Ohashi, 2003).

En Europe, il se trouve une vingtaine d'espèces, ainsi qu'en Turquie, dont certaines sont exotiques. Quatre espèces seulement sont signalées en France (Abdelguerfi, 2002).

En Chine, 42 espèces natives d'*Hedysarum* sont réparties dans le pays et distribuées entre le Nord-ouest et le Sud-ouest, plusieurs d'entre elles sont utilisées dans la médecine traditionnelle pour améliorer l'énergie du corps humain (Dong *et al.*, 2013).

En Iran, la flore spontanée est relativement riches en espèces d'*Hesysarum*, avec environ 28 espèces dont 16 sont endémiques; et jusqu'à ces dernières années, les études sont en train de recenser et de décrire des nouvelles espèces dans ce pays (Ranjbar *et al.*, 2006 ; Ranjbar, 2010).

Dans le bassin méditerranéen, la tribu ‘‘*Hedysarea*’’ est représentée par neuf espèces différentes (Chennaoui-Kourda *et al.*, 2007). Selon Quézel et Santa (1962), l'Algérie comprend neuf espèces différentes endémiques et très localisées, parmi lesquelles *Hedysarum coronarium*, *Hedysarum carnosum*, *Hedysarum spinosissimum*... Onze espèces ont été recensées en Afrique du nord, dont la majorité sont menacées d'érosion génétique voire de disparition définitive (Ben Fadhel *et al.*, 1997 ; Ben Fadhel *et al.*, 2006).

Ce genre (*Hedysarum*) regroupe une multitude d'espèces qui se différencient entre autre par la morphologie, cycle biologique, mode de reproduction, les caractéristiques bioclimatiques et les aires de répartition. La majorité des espèces de ce genre ont une vocation fourragère, citons par exemple: *H. coronarium*, *H. carnosum*, *H. flexuosum*, *H. flavescense*, *H. neglectum*, *H. alpinum*...

(Yurkevich, 2021). De plus, le genre *Hedysarum* est largement utilisé dans la médecine chinoise traditionnelle (TCM), ses plantes sont utilisées pour améliorer l'énergie corporelle. Il renferme des espèces médicinales qui contiennent environ 155 composés bioactifs au niveau des feuilles et des racines qui servent comme des anti-oxydants, anti-tumeurs et ont des effets anti-diabétiques (Dong *et al.*, 2013).

Le genre *Hedysarum* joue un rôle vital dans l'amélioration de la fertilité des sols, fixation des dunes et du sable et la restauration végétative, ses espèces sont des plantes pionnières souvent utilisées en Chine dans la restauration écologique des déserts (Ziyuan *et al.*, 2020).

Selon différents auteurs (Abdelguerfi, 2002 ; Choi et Ohashi, 2003 ; Noutfia, 2008 ; Chennaoui-Kourda *et al.*, 2012), la seule espèce de ce genre qui a bénéficié d'une attention particulière de domestication et d'amélioration est : *S. coronaria* (L.) Medik afin qu'elle soit cultivée.

Bref aperçu sur les trois espèces étudiées de Sulla : Matériel biologique utilisé

1. Description et systématique

1.1. *Hedysarum coronarium*

Le sulla, sulla du nord ou sainfoin d'Espagne (**Figure 1**), systématiquement appelé *Hedysarum coronarium*, est une légumineuse fourragère annuelle à bisannuelle, originaire des régions eurasiatiques et méditerranéennes, endémique des sols argilo-calcaires de la région semi-aride du bassin méditerranéen (Gutierrez Mas, 1983 cité par Fitouri *et al.*, 2012). L'importance accordée au sulla par les agriculteurs et les sélectionneurs revient essentiellement aux caractéristiques positives suivantes: une adaptabilité exceptionnelle, un grand approvisionnement en azote grâce à la fixation symbiotique spécifique (environ 100 kg/ha/an), une production de semences satisfaisante qui contribue à l'enrichissement des banques de semences du sol (Lombardi *et al.*, 2000). Le sulla est une plante précieuse pour les pays chauds, elle est susceptible de rendre de grands services dans les régions baignées par la méditerranée et en particulier en Algérie (Denaiffe et Denaiffe, 1996). Cette espèce a une bonne résistance à la sécheresse qui lui permet un bon développement dans les habitats secs, et peut pousser sur des sols salins et alcalins (Ezzakioui *et al.*, 2015).

Hedysarum coronarium a été récemment reclassée par Choi et Ohashi (2003) comme *Sulla coronaria* (L.) Medik (Annicchiarico *et al.*, 2008 ; Issolah, 2012 ; Issolah *et al.*, 2012). Il est connue par différents noms communs : Sulla, French honey-suckle, chèvrefeuille français, spanish sainfoin, spanish esparcet, sainfoin d'Espagne, sainfoin cultivé (Battandier et Trabut, 1888 ; Issolah et Yahiaoui, 2008), zulla, sweet vetch, vesce doux... (Foster, 2006).



Figure 1 : *Hedysarum coronarium* au stade floraison (Ricardo et José, 2012)

Le Sulla est classé systématiquement comme suit (Abdelguerfi, 2002 ; I.L.D.I.S., 2010) :

Regnum - **Plantae**

Division - **Tracheophyta**

Subdivision - **Spermatophytina**

Class - **Magnoliopsida**

Superordre - **Rosanae**

Ordre - **Fabales**

Famille - **Fabaceae Lindl.**

Sous famille - **Papilionoideae**

Tribus - **Hedysareae**

Genus - **Hedysarum L.**

1.2. *Hedysarum carnosum*

Le sulla de Sousse (**Figure 2**), systématiquement appelé *Hedysarum carnosum*, est une légumineuse annuelle et diploïde ($2n=2x=16$), préférentiellement allogame (Ben Fadhel *et al.*, 2000). Elle présente un mode de germination et de développement bien adaptés aux variations des conditions du milieu aride. Elle est renommée récemment *Sulla carnosa* par Choi and Ohashi (2003).

Elle est originaire des régions méditerranéennes, endémique des régions d'Afrique du nord, Tunisie et Algérie (Quezel et Santa, 1962).



Figure 2 : *Hedysarum carnosum* au stade début floraison (Tela botanica, 2020)

D'après les travaux précédents, elle est caractérisée par une bonne croissance végétative et un bon peuplement des terrains accidentés (arides et salés). Cette espèce du genre *Hedysarum* peut se développer dans des régions à faibles précipitations (150 mm), et même dans des sols calcaires à moyennement calcaires (Abdelgeurfi-Berrekia *et al.*, 1988).

Chaabena *et al.* (2006) ont signalé la présence de *Hedysarum carnosum* parmi les espèces adventices qui se développent dans les cultures maraîchères dans les régions sahariennes. Ils ont précisé que cette espèce n'est présente que sous les palmiers, et elle est nouvellement introduite dans les régions de Ouargla et de Oued Righ (Chaabena *et al.*, 2006).

1.3. *Hedysarum flexuosum*

L'espèce *Hedysarum flexuosum* L. (**Figure 3, A et B**), communément appelée le Sulla et connue sous différents noms communs: Italian or Spanish sainfoin, French honeysuckle or sweet vetch (Kadi *et al.*, 2011); elle est renommée récemment *Sulla flexuosa* par Choi and Ohashi (2003). Elle est originaire des régions ouest de la méditerranée, et présente une aire de répartition relativement limitée. Cette espèce est absente en Lybie, Tunisie, Egypte et Mauritanie (Ben Fadhel *et al.*, 2006).

Au Maroc, *H. flexuosum* est représenté par des populations qui couvrent des petites superficies de 1 à 3ha environ dans les régions ouest du pays (Ezzakkioui *et al.*, 2015). Elle est recensée en Algérie et au Maroc sur des sols marneux et marno-calcaires sous des étages bioclimatiques à pluviométrie moyenne supérieure à 550 mm (Abdelguerfi-Berrekia *et al.*, 1991).



Figure 3 : (A) *Hedysarum flexuosum* en stade pleine floraison (Homrani Bakali, 2019)
(B) *Hedysarum flexuosum* en stade ramification (Originale, 2021)

C'est une légumineuse qui se ressemble beaucoup à *Hedysarum coronarium* de point de vue caractères morphologiques (Kadi *et al.*, 2011); elle est mieux caractérisée par ses petites fleurs cramoisies violacées (rouge intense chez *H. coronarium*) et ses gousses flexueuses, dont la taille et la hauteur facilitent la tonte (Ezzakkioui *et al.*, 2015). Elle joue un rôle clé dans la production organique et la bio fertilisation des sols et l'amélioration et la durabilité des systèmes d'élevage (Zirmi-Zembri et Kadi, 2020). C'est une espèce diploïde préférentiellement allogame, à port érigé avec des ramifications plagiotropes. Les feuilles sont composées imparipennées et les fleurs sont rouge vif ou violacé. La gousse flexueuse de 1 à 4,5 cm de long, constituée de 1 à 4 articles (donc 1 à 4 graines) est couverte d'aiguillons. Les graines de couleur marron, sont réniformes ou ovoïdes (Abdelguerfi-Berrekia *et al.*, 1991 ; Ben Fadhel *et al.*, 1997).

Hedysarum flexuosum a fait l'objet de nombreuses études qui ont révélé ses potentialités fourragères et pastorales (Abdelguerfi, 2002). Kadi *et al.*, (2011) ont signalé que cette espèce présente des caractéristiques nutritives très importantes et la préconise comme alternative à la Luzerne dans la période de son absence (dormance). Ces auteurs mentionnent la richesse de cette espèce en protéines (22,5 g/Kg de MS), en lipides et en minéraux. Ils notent également un taux de digestibilité très proche des autres légumineuses fourragères cultivées, la luzerne (Kadi *et al.*, 2011).

2. Valeur fourragère (potentiel fourrager) et caractéristiques agronomiques

2.1. *Hedysarum coronarium*

H. coronarium est reconnu par sa production fourragère et sa valeur zootechnique importante. Selon Tibe *et al.* (2011) et Chennaoui-Kourda *et al.* (2012), le sulla est caractérisé par une valeur nutritive

très importante avec une teneur élevée en protéines brutes de 14 à 18% de la matière sèche, et des carbohydrates solubles non structurelles qui avoisinent les 25% de la matière sèche et permettent de produire des ensilages de qualité élevée (Lombardi *et al.*, 2000), et des teneurs en fibres alimentaires plus basses que le trèfle blanc ou la luzerne. D'après Denaiffe et Denaiffe (1896), la composition chimique (en %) de la partie aérienne du sulla (**Tableau 1**):

Tableau 1 : Composition chimique de sulla (Denaiffe et Denaiffe, 1896)

	A l'état frais (%)	Substance sèche (%)
Eaux	85	/
Matières azotées	2.83	15.87
Matières amylacées	5.75	38.32
Matières grasses	0.27	1.80
Cellulose	4.63	30.85
Matières minérales	1.97	13.16

Le potentiel fourrager chez le sulla diffère entre la première et la deuxième année de culture. En 1965, Le Houerou, citée par Ben Jeddi (2005) et Fitouri (2011), a obtenu jusqu'à 90 t/ha de matière verte fauchée au stade floraison, soit l'équivalence de 13 t/ha de matière sèche.

La valeur nutritive du sulla s'avoisine beaucoup à quelques espèces fourragères à savoir la luzerne et le bersim (**Tableau 2**).

Tableau 2 : Principaux paramètres nutritives du Sulla en comparaison avec 2 autres espèces (INRA, 1978 cité par Ben Jeddi, 2005):

Paramètres	UFL	PB	CB	PDIN	PDIE
Espèces	/kg de MS	% de MS		g/kg de MS	
Sulla (<i>Hedysarum coronarium</i>)	0.76	15.5	27.9	107	105
Luzerne (<i>Medicago sativa</i>)	0.76	19.3	30.5	134	118
Bersim (<i>Trifolium alexandrinum</i>)	0.72	23.7	16.3	113	106

UFL: unité fourragère lait; **PB**: protéines brutes; **CB**: cellulose brute; **PDIN** et **PDIE**: protéines digestibles au niveau de l'intestin lorsque respectivement l'azote et l'énergie sont facteurs limitant; **MS**: matière sèche

D'après les données du Tableau 2, la qualité nutritive du sulla est très proche à celle de la luzerne et du bersim, les légumineuses les plus utilisés et cultivées en Algérie. En plus, les valeurs en UFL des trois espèces sont similaires.

Dans le monde, les recherches sont en cours en vue de sélection des génotypes à haut potentiel génétique, peuvent dépasser les 17 t/ha en Tunisie et 20 t/ha en Australie, avec une teneur

importante en protéines qui avoisine les 19% de la matière sèche (Ben Jeddi, 2005). A titre d'exemple, en Afrique du nord, la culture du sulla est assez limitée, quelques initiatives à la création variétale sont annoncées en Tunisie "Bikra 21" en 2005 et "Chatra" en 2009 (Ben Rayana, 2014; Hassen *et al.*, 2016), la raison pour laquelle les tunisiens prévoient l'extension des superficies cultivées par le sulla d'une année à l'autre (Fitouri, 2011).

Hedysarum coronarium est caractérisé par : une remarquable productivité dans les périodes froides au moment où les autres espèces fourragères sont en pleine dormance, une large adaptabilité aux sols pauvres et marneux (Abdelguerfi, 2002 ; Moussaouali, 2014). Selon Martiniello *et al.* (2000) et Lapeyronie (1982) cités par Fitouri (2011), le sulla ne supporte pas les températures les plus froides (-4°C), mais aussi il exige un minimum de température des mois froids ne dépassant pas les 3°C.

H. coronarium est considéré une excellente tête de rotation grâce à ces aptitudes d'enrichir le sol en azote et en matière organique, d'améliorer la structure et les propriétés physiques du sol, de lutter contre l'érosion, de re-végétaliser et régénérer les régions touchées par les incendies (Douglas, 1984 ; Rondia *et al.*, 1985 cité par Abdelguerfi, 2002).

Dans ces dernières années, l'*H. coronarium* est cultivé par les agricultures-éleveurs pour l'affouragement, la production du foin et d'ensilage et pour l'apiculture (le miel du sulla est classé parmi les meilleurs types du miel en Algérie) (Slim et Ben Jeddi, 2012; Slim *et al.*, 2018). Selon Douglas *et al.* (1998), en Nouvelle-Zélande, où le sulla est y introduit dans les années 1950s, cette espèce est potentiellement utilisée pour le pâturage, le foin et l'ensilage; ainsi pour la conservation des sols.

2.2. *Hedysarum carnosum*

H. carnosum est une légumineuse pastorale qui se trouve principalement dans les parcours naturels de l'Algérie et la Tunisie dans les parties centrales et méridionales (Ben Fadhel *et al.*, 2000). Elle s'adapte bien aux variations des conditions du milieu aride. Ainsi, c'est une espèce annuelle et diploïde ($2n=2x=16$) et préférentiellement allogame (Ben Fadhel *et al.*, 2000).

C'est une espèce spontanée qui présente à l'état naturelle une germination automnale (en automne) et une croissance végétative qui couvre toute la saison de l'hiver et du printemps; alors que sa floraison commence à la fin du mois de février – début de mars selon les conditions du climat de l'année. Elle fructifie et arrive à la maturation des gousses en mai et juin, puis la plante se dépérît en mois de juillet (Ben Fadhel *et al.*, 2000).

Cette espèce joue un rôle important dans l'alimentation animale grâce à valeur élevée en protéine et en tannins (Aissa *et al.*, 2016). Ces auteurs ont donné un récapitulatif dans le **Tableau 3** sur sa composition chimique selon les résultats finaux de leurs travaux:

Tableau 3 : Composition chimique de sulla (*Hedysarum carnosum*) (Aissa *et al.*, 2016)

	DM	Ash	CP	NDF	ADF	ADL
	%	% de la MS				
<i>Hedysarum carnosum</i>	15,9 ± 6,58	21,96 ± 4,1	14,92 ± 2,9	42,01 ± 6,3	24,65 ± 3,4	8,3 ± 0,99
	DM : Dry Matter (matière sèche) CP : Crude Protein (protéine brute)			NDF and ADF : Neutral and Acid Detergent Fibre ADL : Acid Detergent Lignin		

Selon des études récentes, l'*Hedysarum carnosum* est utilisé, en plus de son rôle fourrager, par les agricultures-éleveurs en apiculture pour la production du miel (Benhizia *et al.*, 2020).

2.3. *Hedysarum flexuosum*

H. flexuosum joue un rôle clé dans l'amélioration et la durabilité des systèmes d'élevage (Zirmi-Zembri et Kadi, 2020). Selon ces auteurs, le sulla en Algérie produit environ 50 tonnes par hectare de la matière verte (approximativement 20% de matière sèche, soit environ 10 tonnes par hectare de MS) avec deux coupes durant l'année. Elle est hautement appréciable et utilisée pour l'alimentation des ovins, des caprins, des bovins ainsi que les lapins. D'après des travaux de recherches, un mélange de 35% de sulla avec le rationnement des lapins a donné des bons résultats de performance.

Errassi *et al.*, (2018) annoncent que les caractéristiques agronomiques de cette espèce de légumineuses sont les suivantes: une productivité remarquable, une palatabilité (appétibilité) très intéressante pour les ruminants et une qualité fourragère très élevée.

Kadi *et al.* (2011) et Zirmi-Zembri et Kadi (2020) ont approuvé que cette espèce a une valeur nutritive très élevée et la préconisent comme un substituant de la luzerne. Ainsi, ils confirment la richesse du sulla en protéines (22,5 g/Kg de MS), en lipides et en éléments minéraux nécessaire pour la croissance, et une digestibilité importante qui avoisine celle de *Medicago sativa*.

Hedysarum flexuosum est caractérisé par une digestibilité très élevé qui peut se changer (diminuer et/ou augmenter) suivant les stades de la croissance. Cependant, les différences de performances de fermentation ont révélé l'existence d'une variation significative dans la qualité nutritionnelle de cette espèce qui est relié automatiquement à sa composition chimique, particulièrement la concentration en tannins condensés (Errassi *et al.*, 2018).

La composition chimique de *Hedysarum flexuosum* est pratiquement similaire à celle de *Hedysarum coronarium*, cette composition dépend essentiellement du stade végétatif au moment de la fauche (Kadi *et al.*, 2015); elle est trop élevée au stade boutons floraux. Selon les mêmes auteurs, l'analyse de la plante entière donne une teneur élevée en protéines qui peut atteindre 22,5 g/Kg de MS, et le **Tableau 4** résume les résultats de ces analyses :

Tableau 4 : composition chimique de *Hedysarum flexuosum*, plante entière (g/kg de MS) (Kadi *et al.*, 2015)

	Stade boutons floraux	Stade début floraison
Matière sèche	579	885
Protéines brutes	225	166
Neutral detergent fibre	490	495
Acid detergent fibre	343	381
Acid detergent lignin	108	90
Energie (MJ/Kg de MS)	17,8	17,03

3. Ecologie et exigences environnementaux des sullas

L'espèce peut tolérer les environnements arides et extrêmes (Tibe *et al.*, 2011), et elle présente une large aire de répartition géographique et pousse sur des sols argilo-limoneux bien drainés et même calcaires, et protège les sols montagneux en pente (Bouajila *et al.*, 2013). A l'état spontané, on peut rencontrer *H. coronarium* à des altitudes variables de 1000 à 2000 m (Lapeyronie, 1982). Selon le même auteur, il n'est pas intéressant de cultiver cette espèce dans les étages bioclimatiques où la température moyenne des mois les plus froids (décembre, janvier, février) est inférieure à 3°C. Ajoutant que le sulla craint les températures basses lorsqu'elle est juvénile seulement (3 feuilles), au-delà, les elles ne constituent aucun souci pour la culture.

D'après Denaiffe et Denaiffe (1896), le sulla a un autre grand intérêt et importance agro-écologique en Algérie c'est qu'elle peut facilement étouffer les adventices et les mauvaises herbes. C'est un trait fonctionnel et adaptatif très intéressante.

Le sulla pousse naturellement dans les régions à sols argileux sur marne, argilo-limoneux à pH ≥ 7 , plus rarement limono sableux (Villax, 1963). Elle peut s'installer sur les terres dégradées, compactes et pauvres où elle joue le rôle de plante pionnière. Selon Slim (2012), l'espèce se trouve en Algérie sur des sols variés dont elle permet la protection contre l'érosion.

En Algérie, le sulla n'est pas cultivé régulièrement comme fourrage à moins qu'à titre expérimental au sein des établissements universitaires ou de recherche, malgré le nombre important des études réalisées sur cette espèce et ses caractéristiques durant ces 20 ans. Par contre, en Tunisie, le sulla est cultivé au nord du pays depuis plus de 4 décennies, et les superficies destinées à sa culture avoisinent les 5,64% des superficies cultivées en fourrages et 28,5 % des légumineuses fourragères, et cette superficie est en continuelle croissance (Fitouri, 2011).

4. Intérêts agronomiques des sullas

- Amélioration de la fertilité du sol

Le sulla contribue, comme toutes les fabacées fourragères, à la fertilisation organo-chimique des sols et maintient une richesse en azote du sol (Fitouri, 2011) grâce aux nodules racinaires contenant des bactéries fixatrices d'azote. Cette matière organique est estimée entre 6 et 9 t/ha/an (Ben Jeddi, 1996). Les nodules permettent de fixer l'azote atmosphérique (N_2) en azote assimilable par la plante. Ainsi, le sulla est connu par son volume racinaire important, et au moment de la dégradation de cette matière organique au biais des microorganismes du sol, ce dernier devient fertile et plus perméable à l'eau. Comme précédent cultural, le sulla a contribué à l'augmentation de la production grainière du blé dur (*Triticum durum* Desf.) de 30% avec zéro apport d'azote inorganique (Slim, 2012).

La plante entière est ainsi utilisée pour la mise en valeur des sols, surtout les sols sableux et les sols riches en sels (Salhi, 2008). La partie aérienne du sulla, riche en éléments minéraux (1 tonne de sulla exporte dans le sol 25kg d'N - 18,7kg de P_2O_5 - 25kg de K_2O), peut améliorer la fertilité du sol, la rétention en eau et sa conservation contre l'érosion par son incorporation dans le sol comme un engrais vert (Fitouri, 2011), en présence des microorganismes du sol. Selon une étude précédente, l'intégration des résidus de sulla dans les systèmes de production comme amendement organique est considérée une solution efficace pour les problèmes de fertilité des sols dégradés, et une sorte d'amélioration de la minéralisation du carbone organique (Bouajila *et al.* 2014).

- Alimentation du bétail

L'objectif final d'une telle culture fourragère, y compris la culture du sulla, est l'obtention des parties aériennes vertes (feuilles, tiges), parce qu'elles sont riches en éléments minéraux et elles sont fauchées plusieurs fois dans l'année et données comme aliment aux animaux d'élevage. Plus qu'une espèce donne des quantités élevées en vert plus qu'elle est jugée intéressante. Le sulla peut couvrir

une grande partie du calendrier fourrager, grâce à ces aptitudes de développement au moment où les autres espèces sont en dormance (Abdelguerfi, 2002).

- Fixation biologique de l'azote atmosphérique

La fixation biologique est un phénomène principal qui se ressemble au phénomène de photosynthèse parce qu'elle aboutit à la fabrication d'un composé organique à partir des composés atmosphériques inorganiques (minéraux). Elle permet de réduire les apports d'engrais azotés de synthèse, avec un enrichissement du sol en azote (Julier et Huyghe, 2010). A l'état normal, l'agriculteur ne doit pas fournir le sulla cultivé par des apports azotés minéraux car cet élément est fourni par voie symbiotique, un taux de 78,2 à 82,7 % des besoins en azote de cette plante proviennent de la fixation atmosphérique (Sulas *et al.*, 2009). Cette proportion peut dépasser 90% dans le cas de présence de rhizobium spécifique efficient (Casella *et al.*, 1984).

Cette opération caractérise quelques souches de bactéries qui sont capables de transformer l'azote moléculaire (N_2) en ammonium (NH_4^+) assimilable par le partenaire végétal.

- Production du miel

Outre les intérêts agronomiques cités ci-dessus, le sulla est bien apprécié par les abeilles (*Apis mellifera*), il est une source importante de nectar dans le sud et le centre de l'Italie (Foster, 2006). Le sulla contribue à une bonne production du miel en offrant des quantités importantes du nectar aux abeilles qui sont attirés par les couleurs vives de ces fleurs (**Figure 4**), et ces abeilles, à leur tour contribuent à une bonne production grainière parce que la pollinisation est principalement assurée par l'*Apis mellifera* (Montero-Castaño et Vilà, 2017). Satta *et al.* (2001) cité par Ben jeddi (2005) ajoutent que les principaux insectes pollinisateurs du sulla sont *Apis mellifera* et *Eucera numida*.

Selon Rondia *et al.* (1985) cité par Fitouri (2011), l'installation de 15 ruches dans un hectare du sulla en floraison améliore la production en graines grâce à la pollinisation entomophile, et produit environ 28 kg/ha du miel. Des chiffres récents confirment qu'un hectare du sulla est suffisant pour nourrir ce nombre de ruches dans une période de 3 mois (mars, avril, mai) qui est la période de l'absence de la majorité des espèces mellifères.



Figure 4 : La fleur du Sulla et la présence de l'abeille *Apis mellifera* (MOUSSAOUALI, 2014)

Selon Benhizia *et al.* (2020), l'espèce *Hedysarum carnosum* est bien utilisée en apiculture, en plus de son rôle fourrager, par les agricultures-éleveurs pour la production du miel.

Associations symbiotiques des légumineuses : potentialités et production

La nutrition azotée des légumineuses dans les systèmes de culture connus dans le monde est assurée par l'une des deux voies complémentaires : soit par l'absorption de l'azote trouvé dans le sol sous forme minérale par les poils absorbants dans le cas où le partenaire symbiotique de cette espèce végétale n'existe pas dans la rhizosphère, soit par la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique (N_2) par des bactéries spécifiques se trouvant autour des racines dans le sol. Dans cette situation, la plante reçoit de l'azote minéral de la bactérie, et cette dernière reçoit de la plante des molécules organiques synthétisées comme les glucides. Dans le cas de la réussite de cette symbiose, on note une économie très remarquable d'engrais azotés en agriculture. Par la suite, l'introduction de légumineuses dans les systèmes de culture permet d'éviter les impacts environnementaux négatifs associés à l'utilisation d'engrais chimiques. Les cultures de légumineuses ont par conséquent un rôle agronomique majeur à jouer dans la gestion des flux azotés de systèmes de culture économes en intrants azotés, et performants du point de vue environnemental (Voisin *et al.*, 2015).

A / Association espèce végétale et une souche bactérienne : *Sulla* et *rhizobium*

La symbiose est une association physique durable au cours de la vie de deux organismes qui en tirent un bénéfice mutuel (Richard *et al.*, 2008). L'association la plus répandue dans le monde végétal est celle qui existe entre une espèce végétale et une bactérie de la famille des *Rhizobiaceae* (Carpéné, 2013), elle est surtout connue chez les fabacées (appelées légumineuses). La symbiose rhizobia-légumineuse, décrite pour la première fois par Frank (1889), présente un modèle d'étude d'association entre eucaryote et procaryote (Selami, 2015). Elle présente un intérêt agro-économique considérable: l'enrichissement naturel du sol en azote et, par la suite, la réduction des apports en azote. L'azote fixé par la symbiose est restitué au sol après la décomposition de la matière végétale (racines, nodules, parties aériennes), ou via les déjections des animaux ayant pâturé (Selami, 2015). D'après des travaux réalisés dans ce sens, le *Rhizobium sullae*, anciennement "*Rhizobium hedysari*", est la seule espèce rhizobiale reconnue à ce jour d'être, capable de noduler le genre *Hedysarum*, précisément l'espèce *H. coronarium* (Squartini *et al.*, 2002 ; Mitchell and Morag, 2017). Ainsi, la nodulation est strictement spécifique surtout chez le *sulla*, ils ont trouvé une souche qui peut noduler plus de 100 espèces de légumineuses n'a pas la possibilité de noduler le *sulla*. Les rhizobia nodulant le *sulla* sont absents dans les sols où cette espèce ne se développe pas spontanément. *H. flexuosum* présente une aptitude élevée à créer des relations symbiotiques avec des bactéries conduisant à des systèmes agricoles durables, et une teneur élevée en chrome dans le sol puisse avoir un effet positif sur la nodulation et la fixation ultérieure de l'azote (Elyemlahi *et al.*, 2017).

D'après des travaux réalisés sur le comportement du sulla en Tunisie, au Maroc et en Algérie montrent que l'inoculation par des souches spécifiques adaptées améliore considérablement sa productivité et son rendement en matière sèche aérienne et protéique (Fitouri, 2011). Cependant, ces souches spécifiques du sulla n'existent pas dans tous les biotopes, mais il y a une possibilité de transférer la souche vers un nouvel habitat et même particulier pour inoculer les plantes dans le but d'avoir une production en biomasse très importante (Mitchell and Morag, 2017).

B / Association espèce végétale et un champignon symbiotique: Sulla et Mycorhize

Dans la couche arable du sol, on peut trouver des champignons microscopiques qui ont la particularité de s'associer avec les plantes au niveau des racines dont le bénéfice entre ces deux êtres vivants est réciproque. La symbiose mycorhizienne est définie comme une association symbiotique entre une plante et un champignon mycorhizien. Cette association ne produit aucune modification morphologique visible à l'œil nu sur l'organe hôte. Le champignon mycorhizien fournit à la plante hôte une absorption de l'eau et des nutriments: macroéléments tels que N, P, K, Mg... et microéléments tels que Zn, Fe, Cu, Mn... (Labidi *et al.*, 2015) ainsi qu'une protection contre les champignons nuisibles, la métaux lourds et les éléments toxiques du sol (Christian et Strullu, 1995 ; Fitouri, 2011; M'saouar *et al.*, 2017), alors qu'il reçoit à leur tour des produits photosynthétiques synthétisés par la plante.

Hedysarum coronarium, comme autres espèces des fabacées de la méditerranée, peut avoir à l'état naturel des associations symbiotiques avec les champignons, mais malheureusement peu d'études, jusqu'à l'heure actuelle, ont travaillé sur ce sujet (Labidi *et al.*, 2015). Cette espèce peut être infestée par l'une des espèces de champignon suivantes: *Septoglomus constrictum*, *Funneliformis geosporum*, *Glomus fuegianum*, *Rhizophagus irregularis* and *Glomus* sp. Cette étude a mis l'accent sur l'intérêt d'introduire des bio-inoculant mycorhiziens à base des espèces autochtones des champignons dans des systèmes de production agricole pour réduire l'utilisation des engrais minéraux phosphatées, et pour maintenir la durabilité des systèmes agricoles dans les sols dégradés, surtout calcaires, dans les régions arides et semi-arides (Labidi *et al.*, 2015).

Selon des travaux récents, *Hedysarum flexuosum* présent une aptitude remarquable à la fixation d'azote en établissant une symbiose entre bactérie rhizosphérique et une endo-mychrhize (M'saouar *et al.*, 2017). Dans une étude réalisée dans le nord-africain, le nombre des spores (AMF; arbuscule) trouvés installés sur les racines du *H. flexuosum* varie entre 1230 et 5840/100g du sol. Ces spores appartiennent à 4 genres différents: *Scutellospora*, *Glomus*, *Acaulospora*, et *Septoglomus* (M'saouar *et al.*, 2019). En plus, les mêmes auteurs ont signalé une corrélation fortement positive entre cette

symbiose et la biodisponibilité du phosphore (P) dans le sol. *Hedysarum flexuosum* est considéré comme une légumineuse mycotrophique par excellence, son mycorhize peut être utilisé pour l'introduction de ce fourrage dans des nouveaux habitats (M'saouar *et al.*, 2019).

Concernant la troisième espèce *H. carnosum*; d'après notre modeste recherche bibliographique nous n'avons trouvé aucune référence ou article ou expérience portant sur cet aspect.

❖ 1- Potentialité / importance des associations symbiotiques

La rhizosphère, espace où se développent les racines, est un environnement particulier d'échange des flux d'énergie et de la matière entre les végétaux et les êtres vivants du sol.

Dans les écosystèmes naturel et cultivé, toutes les plantes ont des besoins plus ou moins importants en azote. En agriculture, et dans la majorité des cas, cet élément est ajouté au sol par différents types et techniques de fertilisation (organique ou minérale), cela revient à sa biodisponibilité qui est fortement limitant. L'azote est un élément essentiel pour le développement et la croissance des végétaux d'une part, et d'autre part pour avoir des produits de qualité. Dans les habitudes culturelles, les agriculteurs ne fournissent pas d'azote aux légumineuses par la fertilisation, car cet élément est offert par la fixation symbiotique.

La fixation de l'azote atmosphérique (N₂) en ammonium (NH₄) par les bactéries est essentielle pour la productivité des végétaux surtout dans les sols pauvres en azote. Environ 60% d'azote fixé sur le globe terrestre provient de la fixation biologique de l'azote (Martinez-Hidalgo et Hirsch, 2017). En Tunisie, la production faible du sulla revient essentiellement aux échecs de l'installation de la culture et du nodulation. Cet échec de fixation symbiotique de l'azote atmosphérique est généralement dû à un apport de l'azote minéral par fertilisation (Fitouri, 2011). Dans le même sens, les chercheurs préconisent la non-utilisation des engrais azotés, même à des petites quantités, dans les sols renfermant des bactéries partenaires à la culture envisagée. Cependant, dans les zones où les bactéries fixatrices d'azote n'existent plus, l'inoculation par des souches efficaces devient indispensable. Cette inoculation a deux méthodes différentes; inoculation directe qui nécessite l'isolement et l'ensemencement de la souche bactérienne dans des conditions contrôlées, et inoculation indirecte où on utilise des quantités du sol ayant des souches rhizobiales. Le rhizobium spécifique du sulla persiste dans le sol pendant la période estivale en quantité suffisante pour favoriser la nodulation et la croissance des plantes l'année suivante.

La fixation symbiotique des légumineuses est un processus biologique très variable. Outre sa variation en fonction de la disponibilité de l'azote minéral dans le sol (elle diminue lorsque l'azote est abondant dans le sol, et à 50 kg/ha d'azote la fixation symbiotique est atténuée), les facteurs

biotiques et abiotiques peuvent affecter ce phénomène : l'excès en eau, le déficit hydrique, le stress salin, le stress thermique, les maladies et les ravageurs des plantes... Un autre facteur qui influe sur ce processus est le facteur génétique, on peut trouver des espèces végétales qui fixent l'azote plus que des autres. A titre d'exemple, le haricot commun (*Phaseolus vulgaris*) fixe l'azote à des quantités inférieures à ces besoins; alors que les légumineuses à graines sont considérées comme des bons fixateurs d'azote tels que le soja (*Glycine max*) et la féverole (*Vicia faba*). D'après Voisin *et al.* (2015), les légumineuses fourragères fixent l'azote à des taux plus ou moins importants entre 80 et 100% de leur besoins; parmi ces espèces : le trèfle (*Trifolium repens*) et le lupin (*Lupinus albus*)... (Voisin *et al.*, 2015).

Dans l'innovation agronomique, en cas d'absence du partenaire bactérien dans le sol à cultivé, l'inoculation par une souche bactérienne efficiente est très réponde et préconisée pour bénéficier de ces avantages. Selon Santos *et al.* (2006) cité par Fitouri (2011), le Brésil a pratiqué une inoculation du soja (*Glycine max* L.) aux champs qui a fourni une économie d'engrais azotés jusqu'à 300 kg N/ha, ce qui entraîne des économies d'argent estimées à 3 milliards de dollars.

❖ 2- Production d'inoculum et du *rhizobium* partenaire efficace

Mécanisme de partenariat

La nodulation chez la plante hôte apparaît dans un moment précis et bien déterminé, généralement elle aura lieu à la phase début végétation (visibles dès le stade 3-4 feuilles chez quelques espèces) et elle demeure jusqu'à la floraison, puis elle va diminuer avec la phase du remplissage des graines et elle va disparaître avec la senescence de la plante; les souches à ce moment-là vont retourner dans le sol où ils vont passer la période difficile sèche.

Les rhizobia localisés à proximité des racines qui ont sécrété les facteurs Nod entrent en contact physique avec le poil absorbant. Sous l'effet des facteurs Nod, le poil absorbant se recourbe, la membrane externe de la racine se dépolarise et le taux de calcium présent dans ses cellules oscille (Gage 2004 ; Oldroyd *et al.*, 2011). Ces différents phénomènes sont nécessaires pour déclencher l'organogénèse du nodule, ainsi pour permettre l'invasion des rhizobia à l'intérieur de la racine.

Le poil absorbant qui se recourbe piège quelques rhizobia entre les parois des cellules apprimées (au cœur de la courbure) (Oldroyd *et al.*, 2011). Les bactéries continuent de se multiplier et forment un foyer (ou une poche) d'infection à partir duquel le cordon d'infection va progresser (Oldroyd *et al.*, 2011). Ce dernier sert à acheminer les bactéries jusqu'au nodule primaire en développement.

Partie II

MATÉRIEL

ET

MÉTHODES

Chapitre 1. Présentation de la région d'étude (Ghardaïa)

I.1. Objectif, zone et la période de l'étude

Les expérimentations ont été réalisées principalement pour identifier les caractéristiques agronomiques et herbagères et préciser les exigences culturales de trois espèces différentes d'*Hedysarum* installées dans les conditions agro-écologiques des régions sahariennes en irrigué.

Ces essais expérimentaux ont été conduits dans les limites de la région de Ghardaïa, qui se situe dans le nord du Sahara septentrional de l'Algérie, entre les wilayas de Laghouat, El-Mineaa et Adrar, El-Bayad et enfin de l'est la wilaya de Ouargla. Cette région est considérée comme une région désertique, à climat hyper-aride, mais elle renferme des micro-climats créés par la pratique des cultures pérennes et saisonnières en présence de l'eau et de l'homme, c'est les *oasis*.

Nous avons traité ces différents aspects et thématiques durant 6 ans, de 2016 jusqu'à 2022. Dans chacune des années, nous abordons un sujet bien précis en installant un essai sur le terrain suivant un protocole expérimental bien déterminé. Nous allons présenter en détails, dans les prochains chapitres de cette partie, les différents points traités en décrivant la région et illustrant la démarche suivie et le matériel utilisé.

I.2. Description de la zone d'étude (situation géo-édapho-climatique)

Tous nos essais expérimentaux ont été installés dans la région de Ghardaïa (**Figure 5**). Le site expérimental qui a abrité nos essais se situe dans la région aride de l'Algérie (Sahara), sous les conditions édaphiques et climatiques de la wilaya de Ghardaïa (600 km au sud de la capitale Alger). Elle se situe à une altitude de 450 m et caractérisés par la latitude 32°29' N et la longitude 3°40' E. La Wilaya couvre une superficie de 24 395 km² (84 660,12 km² pour l'ancien découpage) se composant de 9 communes sont : *Ghardaïa, Berriane, Daya, Metlili, Guerrara, El-Atteuf, Zelfana, Sebseb, Bounoura, Mansoura*.

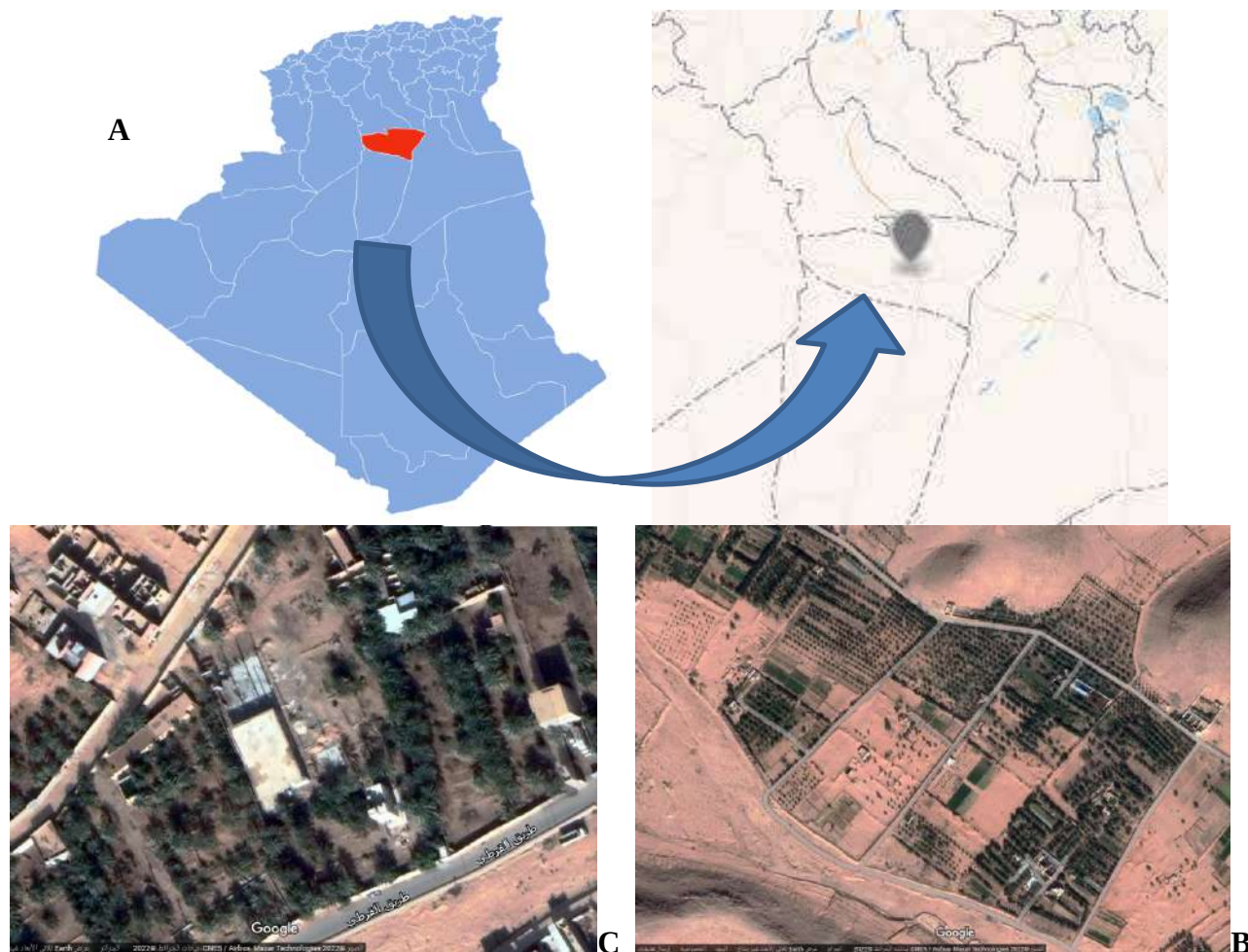


Figure 5 : Localisation des sites d'étude (A: Carte globale de l'Algérie // B: Site de *Laadira* // C: site de *Lintissa*)

Le climat de cette région expérimentale est un climat désertique chaud, caractérisé par un été torride et un hiver froid, une rareté et une irrégularité des pluies annuelles. La pluviosité moyenne annuelle ne dépasse pas les 60 mm, elle varie entre 17,5 et 51,3 mm. Ces pluies occasionnelles s'étalent entre septembre et avril.

La croissance et le développement des plantes sont affectées par les conditions écologiques du milieu (climatiques et pédologiques), la raison pour laquelle nous avons réalisé une étude de quelques paramètres climatiques et de l'état du sol durant la période de la croissance :

a) Températures

Les températures sont relativement élevées pendant l'année, elles permettent la réalisation d'une gamme variée et de qualité de cultures à maturation précoce. Elle bénéficie d'une source d'énergie naturelle considérable produite par une durée d'insolation assez étendue. Les températures sont marquées par une grande amplitude thermique entre le jour et la nuit, entre l'été et l'hiver (**Tableau 5**). La période chaude s'étale du mois de mai au mois de septembre.

Tableau 5 : Températures mensuelles de la wilaya de Ghardaïa (2010/2020) (Station météorologique de Ghardaïa, 2020)

Mois	Janv.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juill.	Aout	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
T.M. (°C)	17	19	22	27	32	37	41	40	35	28	21	17
T.m. (°C)	6	8	10	14	19	24	27	27	23	17	11	7
T. moy (°C)	11	13	16	21	25	31	34	33	29	22	16	12

T.M. = Température maximale; T.m. = Température minimale; T. moy = Température moyenne (T.Min+T.Max/2).

A travers le tableau 05 et la figure 6, nous observons que :

- les températures moyennes les plus basses sont enregistrées au cours du mois de janvier et les plus élevées au mois de juillet ;
- les températures moyennes des maxima les plus faibles sont enregistrées au mois de janvier (16,5°C) et les plus importantes au mois de juillet (41,64°C) ;
- les températures moyennes des minima varient de 5,59°C au mois de janvier à 27,89°C au mois de juillet ;
- l'amplitude thermique entre le mois le plus froid (janvier) et le mois le plus chaud (juillet) est très importante avec une valeur d'environ 35°C.

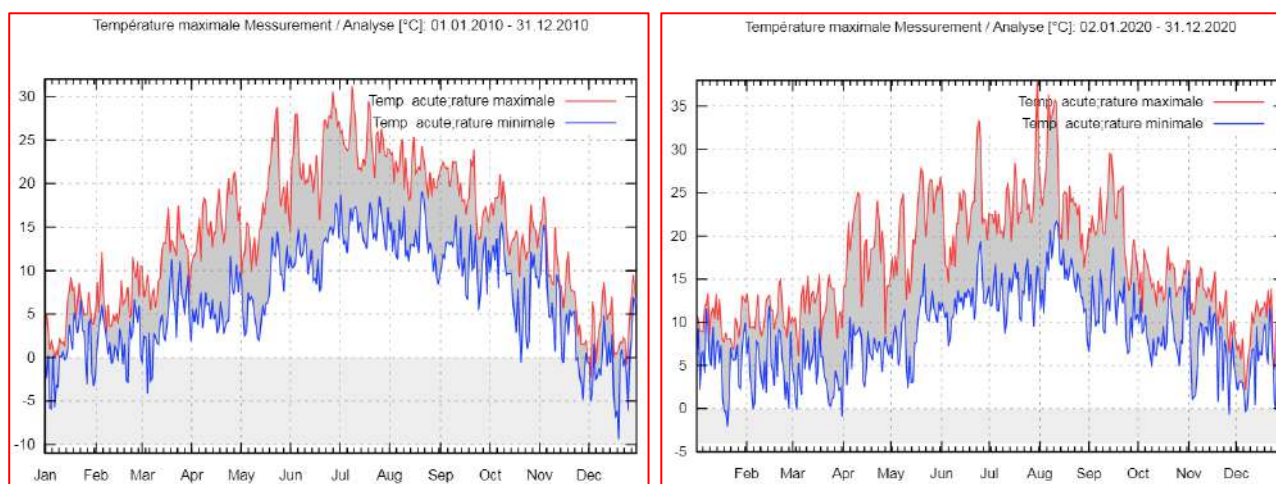


Figure 6 : Exemples des températures (TM et Tm) de la région de Ghardaïa (à droite: 2020 // à gauche: 2010)

Source : <https://www.wofrance.fr/weather/maps/city> (consulté; le 05/07/2022)

Les températures mensuelles sont très différentes entre les mois de l'année, mais on remarque une tendance de l'évolution des températures entre les mois très similaire. On peut enregistrer des

températures inférieures à zéro (environ -8° C en 2010 ; environ -2° C en 2020), alors que les températures de l'été sont trop élevées (plus de 40° C en mois d'août) (**figure 6**).

b) Pluviométrie

La région de Ghardaïa est caractérisée par la **faiblesse des précipitations**. Elles sont très déficitaires et irrégulières entre les mois et les années (**Table 6**), et varient entre 13 et 68 mm sur une durée moyenne de quinze (15) jours par an (**DPAT, 2012**). Les mois de février, mai et juillet présentent une précipitation moyenne qui est largement inférieure à 5 mm pour une période de 10 ans (2010-2020). Les mois de janvier, avril, juin et décembre ont des précipitations qui se situent entre 5 et 10 mm. Les mois de mars et octobre ont des valeurs qui dépassent les 10 mm mais sans atteindre les 15mm. Enfin, les mois plus humides sont relativement septembre et novembre qui avoisinent les 20 mm de précipitations.

Table 6 : Moyenne mensuelle de la pluviométrie de la wilaya de Ghardaïa (2010/2020) (Station météorologique de Ghardaïa, 2020)

Mois	Janv.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juill.	Aout	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
P (mm)	11,5	3,7	7,89	4,35	2,25	1,68	1,12	0,19	15,23	4,29	4,12	3,92
Nombre de jours avec pluies	2	2	2	2	2	1	1	1	2	2	2	2

Dans les 2 graphes ci-dessous (**Figure 7**), nous remarquons la variation des précipitations entre les 12 mois de 2 ans différentes 2010 et 2020. Nous enregistrons une grande différence:

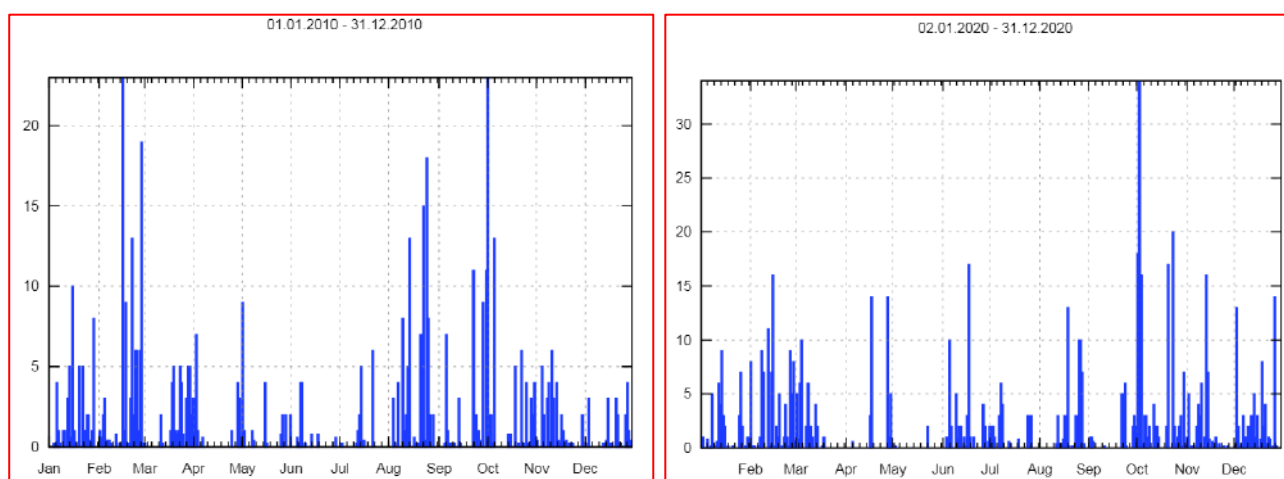


Figure 7 : Exemples des précipitations de la région de Ghardaïa (à droite: 2020 // à gauche: 2010)

Source : <https://www.wofrance.fr/weather/maps/city> (consulté; le 05/07/2022)

Nous remarquons que le pic des précipitations est enregistré pour les 2 exemples pour les mois d'octobre et mars avec des valeurs qui varient entre 25 et 35 mm.

c) Humidité relative et évaporation

L'évaporation est trop élevée, notamment dans la période d'été quand les besoins en eau sont maximales, ce qui fait qu'aucune agriculture ne peut être envisagée sans irrigation ni protection.

Elle est supérieure à 100 mm par mois durant les 9 mois de février jusqu'à octobre, et supérieure à 200 mm/mois du mois de mai au mois d'août. Les températures trop élevées et les vents fréquents et violents provoquent dans la région une évaporation très intense. L'humidité relative dans la wilaya est très faible (**Figure 8**). Elle ne dépasse pas 50% que pour les mois d'octobre, novembre et décembre (**Tableau 7**). Le reste de l'année, elle est très faible et se situe entre 20 et 40 %.

Tableau 7 : Humidité relative mensuelle de l'air de la wilaya de Ghardaïa (2010/2020) (Station météorologique de Ghardaïa, 2020)

Mois	Janv.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juill.	Aout	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
H (%)	44.8	37.7	56.6	53.2	48.7	37.3	34.5	33.3	28.8	33.7	49.8	54.5

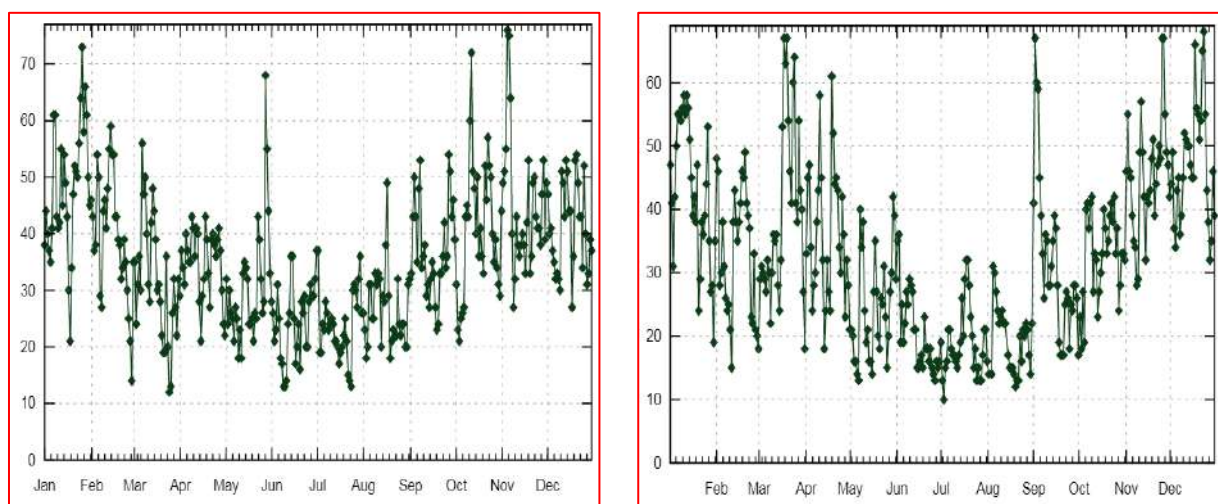


Figure 8 : Exemples de l'humidité relative de la région de Ghardaïa (à droite: 2020 // à gauche: 2010)

Source : <https://www.wofrance.fr/weather/maps/city> (consulté; le 05/07/2022)

D'après les graphiques de la figure 8, nous remarquons que l'humidité relative peut atteindre des niveaux bas arrivant jusqu'à 10% dans les mois les plus chauds de l'année (juin, juillet, août). Donc seule les plantes désertiques qui peuvent résister à ces conditions, ou bien il faut créer un système qui modifie ce biotope en offrant un peu d'humidité de l'air (sans parler de l'eau d'irrigation).

d) Vents de la région : types et vitesse

Le vent est une variable non négligeable de la topographie désertique. Durant quelques périodes de l'année, en général entre Mars et Mai, on remarque au Sahara de véritables tempêtes de sable. Des trompes de sable se déplacent avec violence atteignant plusieurs centaines de mètres de haut.

Dans la région de Ghardaïa, on assiste toujours à deux types de vents locaux:

- Vents chargés de sable dominants Nord-ouest.
- Vents chauds et secs (*sirocco*) dominants Sud-nord.

Le *sirocco* est présent pendant les mois les plus chauds (Juin, Juillet et Aout). Ils sont très secs, favorisent une grande évaporation, par ailleurs ils ont une vitesse relativement faible

Par contre les vents de sable soufflent à partir du mois de mars jusqu'au mois de mai et parfois même jusqu'au mois de juin. Durant nos années de déroulement des essais, nous signalons que la région a connu une période inoubliable des vents de sable violent (mars 2018) qui a duré environ 15 jours successifs, où la majorité des agriculteurs ont perdu des centaines d'hectares de leurs cultures. Sur le même coup, nous avons perdu 3 essais expérimentaux installés simultanément sur le terrain dans la région de *Laadira* (région sud-ouest de la wilaya).

Selon les statistiques de l'office national de la météorologie (Ghardaïa) de 2020, la vitesse moyenne mensuelle du vent sur 10 ans est de l'ordre de 21,22 m/s; alors que les vitesses les plus fortes sont enregistrées durant les mois du mai de chaque année (23,25 m/s).

e) Luminosité et insolation

La luminosité (intensité et durée) est un caractère spécifique du Sahara, l'atmosphère présente une grande pureté durant toute l'année. Le nombre de jours à ciel nu peut atteindre 230 jours/an. La durée d'insolation journalière oscille entre 9,6 h et 14,5 h en fonction des saisons (**Tableau 8**), soit environ 3 410 à 5 165 h/an (la limite théorique tolérable est de 4 380 h/an).

Tableau 8 : Durée moyenne d'insolation en heures dans la wilaya de Ghardaïa (2010/2020) (Station météorologique de Ghardaïa, 2020)

Mois	Janv.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juill.	Aout	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Insolation moyenne (h/jour)	8.64	9.32	8.82	9.68	11.14	11.44	11.37	10.62	9.03	8.31	7.88	8.88
La somme totale des heures ensoleillées dans cette période est de 3490.7 h												

Synthèse climatique

La pluviométrie et la température représentent les facteurs les plus importants pour désigner le climat d'une région donnée. Le diagramme ombrothermique de Gaussen sert à mettre en évidence les périodes humides et sèches de l'année, au alors que l'étage bioclimatique est déterminé par le climagramme pluviométrique d'Emberger.

f.1. Diagramme ombrothermique de Gaussen

Ce diagramme ombrothermique de Gaussen (**Figure 9**) permet de définir les mois secs et/ou les mois humides d'une région donnée.

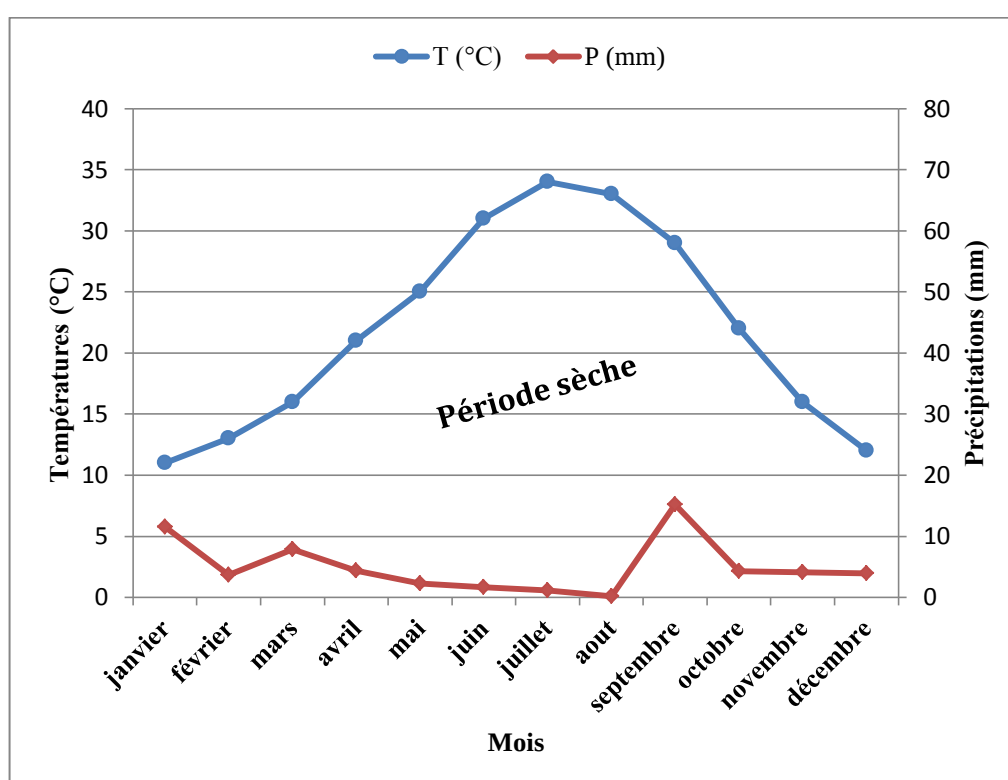


Figure 9 : Diagramme ombro-thermique de Gaussen pour la région de Ghardaïa (2010-2020)

D'après ce diagramme, on peut conclure que la région de Ghardaïa est caractérisée par une saison sèche qui s'étale durant toute l'année (12 mois). Donc, de point de vue agronomique, l'apport en eau pour les cultures installées dans la région est très indispensable durant tout le cycle végétatif.

f.2. Climagramme d'Emberger

La figure 6 montre le climagramme d'Emberger qui permet de distinguer les différentes nuances du climat méditerranéen pour caractériser l'étage bioclimatique d'une région donnée (Morat, 1969). Le quotient pluviothermique d'Emberger (Q3) est déterminé selon la formule suivante :

$$Q3 = \frac{3,43 \times P}{M - m}$$

P : Moyenne des précipitations annuelles (mm),

M : Moyenne des températures maxima du mois le plus chaud (°C),

m : Moyenne des températures minima du mois le plus froid (°C).

Le quotient Q3 de la région d'étude est égal à 3,66 calculé à partir des données climatiques obtenues durant la période s'étalant sur 10 ans de 2010 jusqu'au 2020 (**Figure 9 et Figure 10**).

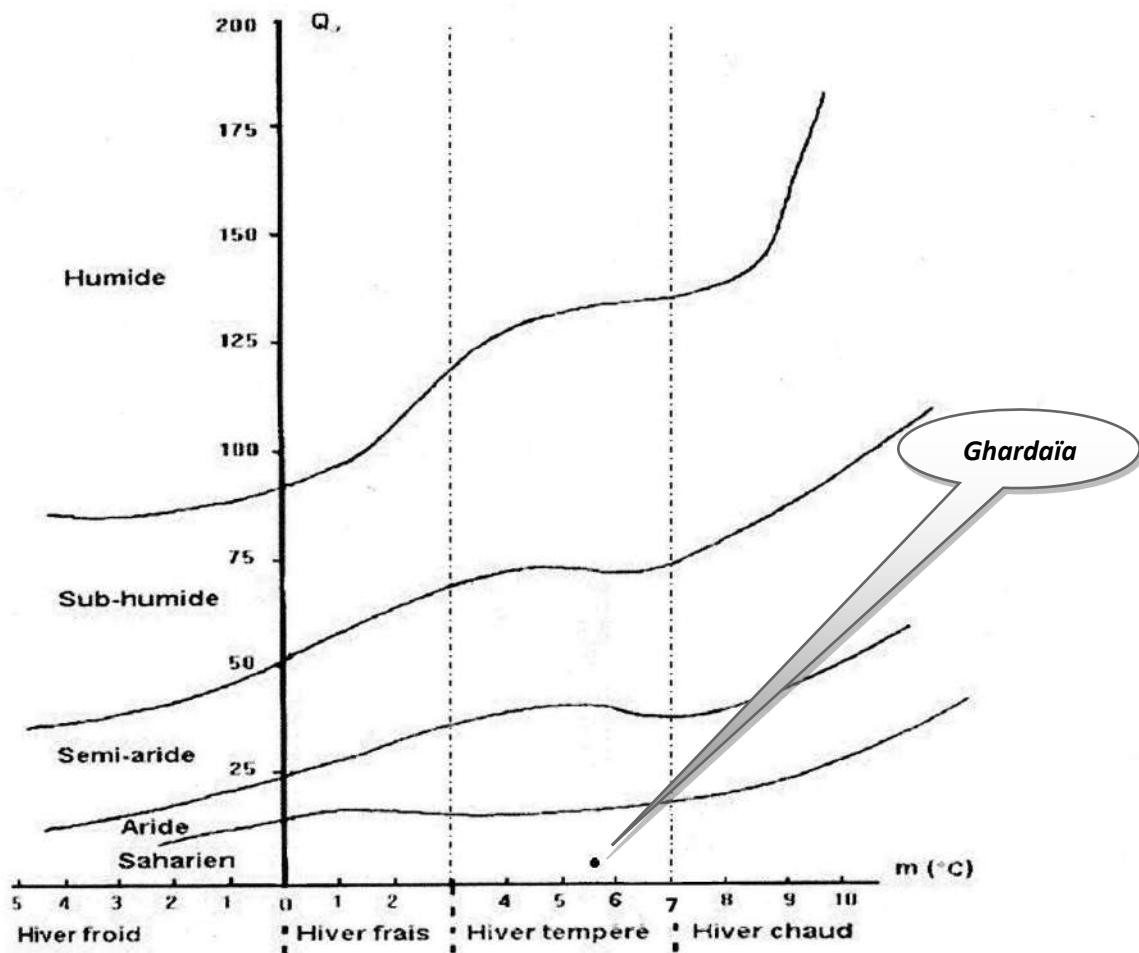


Figure 10 : Place de la région de Ghardaïa sur le climagramme d'Emberger (2010-2020)

Le climagramme d'Emberger précédent montre que la région de Ghardaïa se situe dans l'étage bioclimatique saharien à hiver tempéré qui est caractérisé par la rareté et l'irrégularité des pluies dans l'année. Cette situation nous oblige de chercher une autre ressource en eau pour les plantes cultivées (nappes phréatiques et albiennes).

f.3. L'indice d'aridité de De Martonne (1927)

Cet indice est un indicateur très utile pour identifier et caractériser l'aridité et le degré de xéricité d'une région donnée, en exprimant le caractère restrictif pour certaines formations végétales (Ionac *et al.*, 2015). Il est calculé par la formule suivante:

$$A_a = \frac{P}{T + 10}$$

où **P** est la quantité annuelle de précipitations en mm, **T** est la température moyenne annuelle de l'air en °C.

0 < A_a < 5 aridité absolue (désert sans culture).

5 < A_a < 10 climat aride.

10 < A_a < 20 climat semi-aride.

20 < A_a < 30 climat sub-humide.

30 < A_a < 55 climat humide

A_a calculé sur 10 ans de la région de Ghardaïa est égal à **0,12** qui est nettement inférieur à 5; cela veut dire que la région d'étude se situe dans un climat à aridité absolue.

I.3. Caractéristiques agronomiques et écologiques de la région

I-3-1- Couvert végétal et agriculture

La wilaya de Ghardaïa a un couvert végétal très faible, vu les conditions climatiques difficiles. Elle est connue par une alternance entre deux types de végétation : **plantes éphémères**, appelées encore "achebs", n'apparaissant qu'après la période des pluies occasionnelles et disparaissent juste après qu'elles effectuent leur cycle végétatif qui est très court avant que le sol ne soit desséché ; et **plantes permanentes ou vivaces**, qui ont aussi un mécanisme d'adaptation spécifique, à côté de phénomènes physiologiques encore mal connus, un ensemble d'adaptation morphologique et anatomique qui consiste surtout en un accroissement du système d'absorption racinaire et une réduction de la surface foliaire lieu d'évaporation. Elles ont la capacité de survivre en vie ralentie durant de longues périodes et sont dotées de mécanismes d'adsorption racinaire et de rétention d'eau performants (Ozenda, 1991).

D'une autre coté, les terres utilisées pour l'agriculture sont estimées à **1 370 805** ha dont :

- Surface agricole utile (S.A.U) : **64 385** ha en irrigué en totalité.
- Pacages et parcours : **1 306 248** ha.
- Terres improductives des exploitations agricoles : **172** ha (DSA Ghardaïa, 2018)

Le secteur de l'agriculture est caractérisé par deux systèmes d'exploitation :

- Oasien de l'ancienne palmeraie ; et la mise en valeur.

Le patrimoine phoénicicole de la Wilaya est de **1.297.510** palmiers en 2019, dont **1.140.996** palmiers productifs pour une production annuelle moyenne de 60 400 tonnes dont 24 000 tonnes de type Deglet Nour. Avec l'extension des surfaces, le secteur de l'agriculture offre de grandes perspectives de développement (DPAT, 2019).

- Le système oasien couvre une superficie d'environ **4 124 hectares**. Ce système oasien qui est inclus dans l'ancienne palmeraie est caractérisé par une forte densité de plantation, palmiers âgés, irrigation traditionnelle par submersion (séguia), exploitations mal structurées et fortement morcelées (**0,5 à 1,5 ha**) qui sont complantés en étages palmiers dattiers, arbres fruitiers, maraîchage et fourrages en intercalaire. Des activités d'élevages familiaux sont souvent pratiquées avec des cheptels de petites tailles.

- Pour le système de la mise en valeur, l'état a exécuté différents programmes d'exploitations :

- * Mise en valeur dans le cadre de la loi 18/83 du 13/08/1983 (APFA) : Attribution de **210.082,15 ha** attribuées pour 12930 attributaires.

- * Mise en valeur dans le cadre de la concession :

- Périmètres destinés aux jeunes : avec un nombre total des périmètres destinés aux jeunes de 95 périmètres pour une superficie de **14 314.82 ha**.

- Périmètres destinés aux investisseurs : en deux tranches :

- 1^{ère} tranche de **39.190 ha** pour 288 investisseurs en cours d'assainissement,
- 2^{ème} tranche de **38 837.91 ha** procédure d'attribution en cours (DPAT, 2019).

I-3-2- Production agricole de la wilaya de Ghardaïa

Les agriculteurs de la région pratiquent essentiellement la céréaliculture, le maraîchage, les cultures fourragères et industrielles en plus de l'arboriculture.

Les superficies affectées à chaque culture, les quantités récoltées et les rendements sont détaillées dans le **Tableau 9**:

Tableau 9: Spécifications pratiquées dans la région de Ghardaïa, avec superficies et rendements (MADR, 2019)

Cultures	Superficies réalisées en ha	Superficies récoltées en ha	Quantités récoltées en q	Rendement moyen en q/ha
Céréales	6914	6914	256474	37,10
Fourrages	5800	5800	1154900	192
Maraîchage	4400	4400	865700	196,8

Concernant les cultures fourragères, la tendance du choix des espèces à cultiver est strictement orientée vers l'avoine, l'orge, le maïs, le sorgho et la luzerne. Ce qui reflète les quantités faibles et insuffisantes du vert destiné à l'alimentation du bétail.

Les cultures fourragères pratiquées dans la région sont conduites en irrigué (pas de fourrages consommée en sec). Les superficies emblavées et les productions obtenues par espèces cultivées sont présentées dans le **Tableau 10**:

Tableau 10: Superficies et productions des cultures fourragères dans la région de Ghardaïa (MADR, 2019)

	Superficies (ha)	Productions (Qx)	Rendements (q/ha)
Maïs-sorgho	2590	774200	298.9
Orge, avoine et seigle en vert	1820	202800	111.4
Trèfle et luzerne	1390	177900	128.0

Nous remarquons ainsi l'absence des espèces à haute qualité fourragère et nutritionnelle, sauf la luzerne et le trèfle avec des superficies réalisées et récoltées de **1 390 ha**, et une quantité récoltée de **177 900 q** avec un rendement moyen de **128 q/ha**.

D'après les tableaux 9 et 10, les superficies réservées à la culture des fourrages sont très restreintes, et les productions restent insuffisantes si on prend en considération la population locale en cheptel qui est importante par rapport au disponible :

- Bovins : 4189 têtes ;
- Ovins : 363000 têtes ;
- Caprins : 161400 têtes ;
- Camelins : 11650 têtes.

Chapitre 2. Enquête sur les cultures fourragères dans la région d'étude

2.1. Enquête sur la pratique des cultures fourragères dans les systèmes de production agricole de la région

2.1.1. Introduction

La pratique des cultures fourragères dans les systèmes de production a pour principal objectif d'améliorer la production animale particulièrement en lait et en viande. Pour améliorer cette production animale dans une région donnée, il nous faut non seulement une amélioration génétique et une maîtrise de la santé du troupeau, mais aussi on doit chercher en parallèle à améliorer son alimentation. Trois à quatre milliards d'hectares, soit près de 80% de toutes les terres utilisées pour l'agriculture servent à nourrir les animaux d'élevage (Klein *et al.*, 2014). À cet effet, l'éleveur consacre beaucoup de temps, d'effort et de ressources pour réduire les déficits saisonniers par une fourniture en aliments complémentaires de qualité et/ou des fourrages, en particulier en hiver pour les zones tempérées ou bien en saison sèche pour les zones tropicales. La production locale au sein de l'exploitation des cultures fourragères garanti une gestion économique des apports alimentaires du cheptel. L'introduction des espèces ou des cultures dans le système fourrager habituel s'organise selon les objectifs d'élevage, d'amélioration des performances du troupeau et des conduites de toutes les cultures.

2.1.2. Objectifs de l'enquête

Les cultures fourragères sont pratiquées depuis un ex-temps dans la région de Ghardaïa, elles suivent l'augmentation et la croissance du cheptel élevé dans la wilaya, mais d'après les statistiques agricoles on trouve toujours que les quantités produites de cette matière principale n'a jamais suffi les besoins locaux. Les agricultures sont, chaque saison, invités à chercher des quantités énormes des fourrages dans des autres régions voisines.

La présente étude a pour objectif principal, la conception d'un récapitulatif des principales espèces fourragères cultivées dans la région de Ghardaïa (graminées et légumineuses) pour la raison de cerner le sujet des pratiques culturelles des fourrages appliquées dans la région, la chose qui va nous donner une idée sur la valeur de la production animale existante et envisagée. Or la wilaya de Ghardaïa est annoncée comme un bassin laitier dans ces dernières années.

2.1.3. Identification et choix des zones enquêtées

L'agriculture de la région est connue, en général, par deux systèmes de production : système oasien où les cultures sont placées dans des palmerais entre les arbres (en strates); système de mise en valeur où la pratique des cultures se fait sous pivot en intensive. Dans cette enquête, nous avons essayé de prendre des enquêtés des deux systèmes. La démarche est basée sur des enquêtes socio-économiques sous forme d'un questionnaire distribué auprès des agriculteurs-éleveurs pratiquant cette spéculation. Le choix est basé sur quelques critères subjectifs tels que : aptitude à la coopération, la pratique réelle et actuelle des cultures fourragères, accessibilité à l'exploitation (proche)... pour ce faire, nous avons demandé l'assistance d'auprès la direction des services agricoles pour faciliter la recherche et l'obtention des contacts.

En conséquence, 34 exploitants ont été touchés par l'enquête, ils sont répartis entre les 11 communes de la wilaya : Ghardaïa, Guérrara, Daïa Ben Dahoua, El-Menia... (**Tableau 11**). Le choix de ses différentes zones est dicté par des considérations de représentativité mettant en évidence l'existence des cultures fourragères au sein des exploitations.

Tableau 11 : les exploitations enquêtées dans la wilaya par commune

Wilaya	Périmètre agricole	Type de l'exploitation	Nombre d'enquête
Ghardaïa	Hassi lefhel	Mise en valeur + Système oasien	5
	Sebseb	Système oasien	2
	Daïa Ben Dahoua	Système oasien	4
	Métlili	Système oasien	2
	Mansoura	Système oasien	2
	Berriane	Système oasien	2
	El-Atteuf	Système oasien	1
	Bounoura	Système oasien	1
	Guérrara	Mise en valeur + Système oasien	3
El-Menia	El-Menia	Mise en valeur	5
	Hassi el Gara	Mise en valeur + Système oasien	4
	Oued Djafou	Mise en valeur	3
Total			34

L'enquête a été effectuée pendant 2 mois sur deux (02) saisons agricoles successives; entre février 2021 et avril 2021(1^{ère} saison) puis entre décembre 2021 et février 2022 (2^{ème} saison). Les éléments de l'enquête se subdivisant en trois groupes:

- Identification de de l'exploitant: nom de l'agriculteur, âge, niveau d'instruction et ancienneté dans le domaine...
- Identification de l'exploitation: région, position géographique, superficie, relief, vocation agricole, nature de l'exploitation, ...
- Les pratiques culturales: cultures pratiquées, emblavures, superficie cultivée pour les fourragères, principales espèces fourragères cultivées...

2.1.4. Traitement statistique des données de l'enquête

Toutes les données collectées et recueillies de cette enquête sont traitées simplement par le logiciel Excel version 2010 afin de réaliser les statistiques descriptives et construire les graphiques.

2.2. Enquête sur les maladies des cultures fourragères et les produits phytosanitaires utilisés pour la lutte

2.2.1. Introduction

Les cultures fourragères jouent un rôle très important dans le secteur agricole. Elles sont liées étroitement à l'élevage et à la production animale, donc elles sont entourées par une importance économique très remarquable. A cet effet, ces cultures doivent être suivies, entretenues et protégées pour assurer un bon rendement et une bonne production. Selon Klein *et al.* (2014), pour protéger les cultures fourragères contre les maladies et les attaques d'insectes il nous faut un choix précis d'espèces et de variétés résistantes. Les cultures fourragères mono spécifiques semblent plus vulnérables que les mélanges, surtout si elles se pratiquent sur des milliers d'hectares.

En terme du coût et de développement durable, les chercheurs constatent que si une maladie des végétaux est trouvée dans une culture fourragère, ou si on assiste à une invasion parasitaire, c'est rare de trouver réaction sérieuse à travers une intervention chimique par un produit phytosanitaire, d'un côté en raison du coût en comparaison de la valeur du fourrage perdu, et d'autre côté à cause de sa toxicité potentielle pour le bétail (risque de mortalité) et de sa nuisance sur le milieu naturel (sol

et eau) (Klein *et al.*, 2014). D'où la nécessité de choisir des plantes résistantes aux maladies et aux parasites.

2.2.2. Objectifs de l'enquête

La présente étude a pour objectif principal de recenser les ravageurs et les maladies qui attaquent les cultures fourragères (Poacées et/ou Fabacées), soit dans le système oasien soit sous pivot; ainsi, chercher à identifier les produits phytosanitaires utilisés sur les cultures fourragères dans la région de Ghardaïa à travers une enquête.

2.2.3. Identification et choix des zones enquêtées

Dans la présente enquête, nous avons travaillé sur les mêmes agriculteurs et les mêmes exploitations échantillonnées dans l'étude précédente.

2.2.4. Traitement statistique des données de l'enquête

Toutes les données collectées et recueillies de cette enquête sont traitées simplement par le logiciel Excel version 2010 afin de réaliser les statistiques descriptives et construire les graphiques.

Chapitre 3. Installation et déroulement des essais expérimentaux

Après la réussite de notre expérience réalisée sur le sulla en 2012-2014, où nous avons obtenus un ensemble de résultats impressionnants qui méritent d'être poursuivis, nous avons choisi la continuité et l'approfondissement dans le même sujet en ajoutant des axes de recherches proches à notre étude pour l'enrichissement de ce sujet.

Au cours des années de réalisation de notre projet de Doctorat, nous avons réalisé un ensemble d'études et d'expériences sur plusieurs aspects qui concernent la culture du sulla dans la nouvelle région pour arriver à caractériser les caractéristiques agronomiques de cette espèce (ces espèces) qui est introduite pour la première fois dans la région, en vue d'une production fourragère intéressante qui va améliorer le calendrier fourrager de la wilaya de Ghardaïa qui est considérée comme une zone laitière par excellence avec un nombre important des têtes bovines de différentes races, à côté d'autres types d'élevages: ovin, caprin, camelin...

3.1. Comparaison de la germination, de la croissance et de développement de 3 écotypes différents du Sulla (*Hedysarum coronarium*)

3.1.1. Objectif et choix des écotypes

Le sulla se trouve un peu partout dans le nord algérien à l'état spontané. Les caractéristiques topographiques et climatiques d'une telle région exigent la présence/absence du sulla. L'altitude et la pluviométrie jouent un rôle principal dans cette distribution. L'objectif de cette étude est de chercher le germoplasme (écotype) qui peut s'adapter et se développer normalement dans la région d'étude pour l'intégrer ultérieurement dans le système de culture.

3.1.2. Prospection et collecte des semences; protocole expérimental

Pour collecter les semences, nous avons choisi 4 régions (wilayas) différentes pour chercher et collecter les semences du sulla (*Hedysarum coronarium*). Nous avons réalisé des prospections dans les wilayas suivantes : Sétif, Jijel, Béjaïa, El-Tarf. La prospection sur le terrain est réalisée par moi-même en juin 2017, ainsi, nous avons essayé d'impliquer quelques institutions étatiques pour cette tâche telles que l'Institut National de la Recherche Agronomique de Sétif. Une fois ces semences sont terminées nous renouvelons la prospection à nouveau : 2019, 2020 et 2021.

Avant la mise en place de l'essai, nous avons réalisé un test de germination dans les conditions du laboratoire (**Figure 11**). Nous avons choisi au hasard 10 graines de chaque population, puis mis dans

des boites de Pétri en plastique tapissé du coton, et irrigué de temps en temps à l'eau de robinet. Après une semaine, nous avons remarqué que le taux de germination est autour de 85 à 90%.

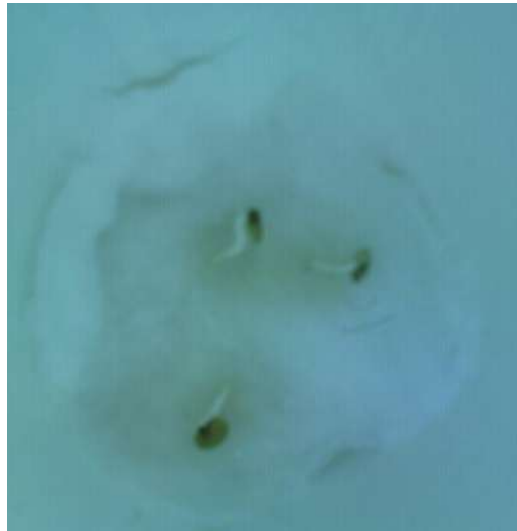


Figure 11 : Test de germination

Le dispositif expérimental installé est un dispositif simple, où nous avons utilisé 3 écotypes différents du *sulla* provenant de 3 régions différentes de l'est algérien: El-Tarf, Sétif et Bejaïa. Nous avons réalisé le semis, le 21/12/2017, dans des plaques à alvéoles, remplies au préalable par du terreau commercial (**Figure 12**), pour éviter la perte des graines et aussi pour bien suivre la croissance des plants. Le nombre des grains semés est de 300 graines par population. L'irrigation par pulvérisation a été démarrée le même jour de semis.



Figure 12 : Préparation des semences et du substrat

3.1.3. Paramètres mesurés pour la germination

Durant l'étude, nous avons suivi la culture dans des intervalles constants pour mesurer quelques paramètres morphologiques et biométriques.

* **La date de germination:** nous avons noté la date l'apparition du premier plant pour chaque population, mais la chose la plus importante est la date de la germination de 50% de la population (pour déduire le nombre de jours entre le semis et la germination : JAS). Les graines ont été imbibées avec de l'eau de robinet chaque deux jour (dessèchement du terreau).

Nous avons considéré une graine comme germées lorsque la tigelle avait sorti du sol et elle a une longueur de quelques millimètres.

* **Le taux de germination** a été noté régulièrement, chaque trois jour, pendant une période de 10 jours. Nous avons remarqué que c'est fréquent de mettre des semences dans le sol, mais la germination n'aura pas lieu; c'est la dormance. A cet effet, les semences ont été traitées par l'acide sulfurique pendant 20 à 25 minutes pour lever la dormance (Hiltner, 1902; Kheloufi et Mansoiri, 2017). A la récolte des semences, on trouve toujours deux types de graines: des graines ayant une couleur du tégument verte et des graines avec une couleur brune.

Selon une étude réalisée sur 400 graines des légumineuses, elle a révélé que 80 % des semences germées sont vertes, c'est le cas de *Hedysarum coronarium*. A cette cause, nous avons souffrit de ce problème de dormance et de dureté de nos semences.

* **Le pourcentage de germination:** il donne une bonne idée pour la santé des graines et l'état de dormance et de dureté. Ce pourcentage est calculé par la méthode suivante le dernier jour du suivi:

$$PG (\%) = \frac{\text{Nombre de semences germées}}{\text{Nombre de semences testées}} \times 100$$

* **L'indice de taux de germination:** il a pour but de vérifier le pourcentage de germination dans chaque jour de la période de germination dès le 1^{er} jour. Cet indice est calculé comme suit:

$$ITG (\%) = \sum \frac{\text{Nombre de semences germées}}{\text{Nombre de jours}}$$

* **Nombre de jours entre la germination et les différents stades phénologiques**

Cette variable va nous donner une idée sur la période s'étalant du moment de la germination jusqu'à l'un des neufs stades caractérisant la croissance et le développement des légumineuses. Ce nombre de jours nous permet de faire des comparaisons entre notre étude et celles des autres auteurs, soit pour l'espèce cultivée (*Hedysarum coronarium*) ou même pour les autres (*H. carnosum* et *H. flexuosum*).

3.1.4. Traitement statistique des données

Les résultats recueillis le long de cette expérience et pour l'ensemble des paramètres ont subi des analyses descriptives pour faire la différence entre les écotypes utilisés dans cet essai en utilisant le logiciel Excel (version 2010) et aussi pour la construction des graphiques.

Le logiciel R (version 4.0.0) est ainsi utilisé pour réaliser l'ANOVA à un seul critère de classification (la provenance). La détection des groupes homogènes a été faite en utilisant le test de Newman et Keuls au seuil de 5%.

3.2. Comparaison de la production herbagère et fourragère de trois espèces de *Hedysarum*

3.2.1. Objectif de l'essai et du choix des espèces

Les espèces du genre *Hedysarum*, quoique ce soit annuelles ou pérennes, sont réparties dans tout le monde et dans des habitats différents. Cela veut dire qu'ils sont caractérisés par un large spectre de diversité. En plus, et d'après plusieurs auteurs, les espèces de ce genre ont des avantages très intéressants en agriculture, et ils ont annoncé depuis longtemps que le sulla a été introduite par excellence dans des zones marginales y compris les sols calcaires et semi-arides. La principale raison pour laquelle le sulla est cultivé est l'alimentation des ruminants, conservation des sols, production du miel et réduction de l'utilisation des engrais chimiques. Face à ces enjeux, la culture de quelques espèces adaptées du sulla dans notre zone d'étude est une étape première dans un long challenge pour trouver des solutions qui couvrent le problème de manque du vert destiné aux bétails.

L'objectif principal de la présente expérience est de caractériser l'adaptation et le comportement de 3 espèces différentes d'*Hedysarum* (*Hedysarum coronarium*, *Hedysarum carnosum*, *Hedysarum flexuosum*) et de déterminer la production fourragère et herbagère dans la région de Ghardaïa où ils sont cultivés pour la première fois. Nous avons choisi les espèces les plus répandues en Algérie et les plus utilisées dans les recherches scientifiques suite aux bons traits fonctionnels présentés.

Jusqu'à l'heure actuelle, et dans la limite de nos connaissances, aucun travail scientifique qui a été mené sur ces espèces (ou même l'un de ces espèces) dans les conditions pareilles.

3.2.2. Prospection et recherche des semences

Les semences des trois espèces cultivées dans cette étude sont collectées en juin-juillet 2020 de leurs habitats naturels. Ces 3 régions sont : Sétif, Biskra et Tizi-Ouzou pour *H. coronarium*, *H. carnosum* et *H. flexuosum* respectivement.

3.2.3. Lieu de l'essai et dispositif expérimental

Le site expérimental choisi pour cet essai est celui de *Lintissa*. Il se trouve au sein d'une exploitation privée qui se situe au niveau du périmètre agricole *Belghannem* (32°28'58,79'' N– 3°37'30,64''E), qui a un système de production oasien, couvrant une superficie de 1 hectare, et distante de 3 km du chef-lieu de la commune de Ghardaïa.

Les 3 espèces collectées du sulla (*H. coronarium*, *H. carnosum* et *H. flexuosum*) ont été semées dans le site prédéfini, le 26 novembre 2020, selon un dispositif en bloc aléatoire et complet, avec trois (3) répétitions (**Figure 13**), donc nous avons au total 3 blocs et 9 parcelles et 27 micro-parcelles. Chaque micro-parcelle (4m²) représente une espèce précise, avec 4 rangés de 2m de long espacés de 0.4m; soit au total 4 lignes x 3 répétitions donc 12 lignes par espèce.

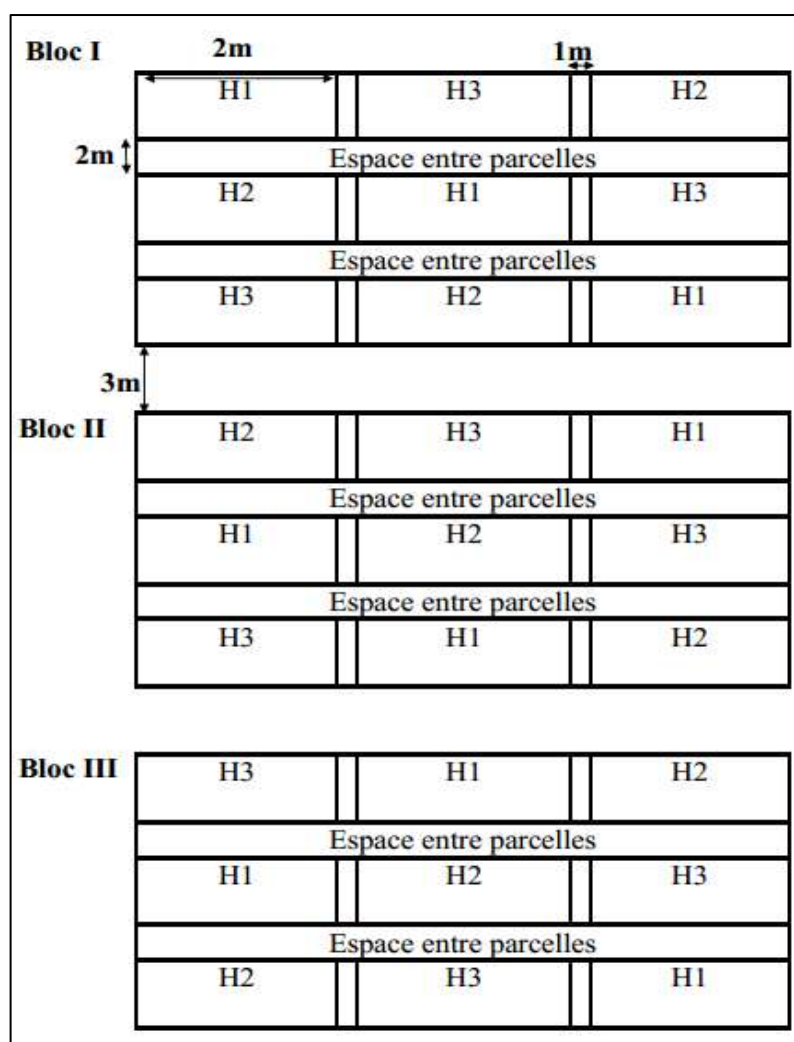


Figure 13 : Dispositif expérimental adopté

H1 : *H. carnosum* H2 : *H. flexuosum* H3 : *H. coronarium*

La dose de semi n'est pas bien pris en considération vu la santé des graines et le problème de la dureté des graines (dormance tégumentaire et embryonnaire). Nous avons mis un excès des graines

pour avoir un nombre acceptable des plants. D'après la variation du poids de mille graines des espèces, nous avons adopté une dose moyenne variant de 3,5 à 4 g/m² de graines en gousses (la dose habituellement recommandée est 2 g/m²), soit de 1,1 à 1,3 g/m² des graines décortiquées. Au cours de l'essai, on a éclairci la population en enlevant les plants morts, chétifs et indésirables à condition de garder environ 16 à 20 plants par micro-parcelle pour servir dans l'analyse biométrique.

L'irrigation a été commencée le même jour de semis, 3 à 4 fois par semaine selon les saisons.

3.2.4. Caractérisation agronomique du sulla cultivé (paramètres à mesurer)

Après 6 mois de suivi et d'entretien et exactement au stade début floraison en mois d'avril (soit environ 130 à 140 jours après le semis), nous avons commencé l'arrachage des plants d'une façon au hasard pour servir à évaluer quelques paramètres morphologiques, fonctionnels et quantifier la production fourragère des 3 espèces.

Les paramètres d'évaluation des espèces cultivées choisis sont des paramètres destructifs, soit mesuré à la fin du cycle des plantes, ils ont été déterminés comme suit:

A- paramètres sur la plante entière:

- La hauteur des plantes en printemps : est un paramètre très important parce qu'il nous donne l'état de santé et de vigueur des plantes. C'est la distance entre le sommet de la plante (tissu photosynthétique supérieur) et le niveau du sol. On a mesuré sur chaque parcelle et sur chaque ligne la hauteur des plantes. Elle est mesurée en cm par une règle conventionnelle graduée.
- La biomasse fraîche et sèche printanière: chaque plant arraché doit être pesé pour déduire le poids frais (en g), puis repesé une autre fois après le passage à l'étuve (70° C pendant 48h) pour déduire le poids sec (en g). Le poids sec divisé par les poids frais donne le taux de matière sèche (sans unité). On converti ce poids sec à 1 hectare pour trouver la biomasse sèche (en t/ha).
- Nombre de ramification par plante: c'est le nombre de tiges constituant la plante. Plus que la plante a plusieurs ramifications plus que la plante est performante et peut supporter le poids des feuilles d'un côté, et d'autre côté elle peut résister contre les dents des animaux.
- Nombre de feuilles par plante: on a compté toutes les feuilles qui sont attachées sur les rameaux de la plante.
- Poids des feuilles et des tiges: après le détachement de la totalité des feuilles dans le paramètre précédent, nous avons pesé séparément les feuilles fraîches (poids frais des feuilles, en g) et les tiges fraîches (poids frais des tiges, en g).
- Rapport feuilles/tiges: sur les mêmes plantes échantillonnées, utilisées pour les paramètres précédents, le poids des feuilles est divisé par le poids des tiges. Ce paramètre est très intéressant pour la détermination de la qualité fourragère.

- Nombre d'inflorescences totales: au moment de la réalisation des mesures au stade floraison, nous avons compté le nombre total des inflorescences que renferme la plante échantillonnée.
- Nombre d'inflorescences épanouies: d'après les inflorescences séparés des plantes, nous avons compté cette fois-ci seulement les inflorescences ouvertes et épanouies qui ont généralement une couleur vif.
- Longueur des racines: à l'arrachage des plantes au stade floraison et après la séparation de la partie aérienne de la partie souterraine au niveau du collet, nous avons mesuré la longueur des racines. Ces longueurs ont été mesurées par une règle graduée en cm.

B- paramètres sur les feuilles des plantes:

Pour la mesure de ces paramètres, nous avons choisi au hasard 5 feuilles différentes cueillies des plantes mesurées précédemment, pour servir aux mesures suivantes:

- Nombre de folioles par feuilles: sur chaque feuille choisie au hasard nous avons compté le nombre des folioles qui la constituent. Chaque feuille est constituée de 3 à 5 paires de folioles qui ont une forme ovale ou elliptique à arrondies. Ce nombre peut être différent entre les espèces de *Hedysarum*.
- Poids frais et sec des feuilles: avant la réalisation du paramètre précédent, on procède à la mesure du poids frais des feuilles par une balance de précision pour déterminer le poids frais (en g), puis après le comptage des folioles, ces mêmes feuilles vont passer à l'étuve (70° C pendant 48h) pour déterminer le poids sec. Ces deux paramètres vont servir à la détermination des paramètres suivants.
- Surface foliaire spécifique SLA: c'est un paramètre très intéressant pour l'étude de l'adaptation et le fonctionnement des espèces végétales (évolution fonctionnelle). Il a attiré l'attention des écologistes et des agronomes dans les derniers temps. Elle est utilisée comme un indicateur du taux de croissance relative (**RGR**) et de l'économie de ressources relativement à la disponibilité des nutriments (Cornelissen *et al.*, 2003). SLA est un rapport entre la surface de la feuille fraîche en cm² et son poids sec en g (Smart *et al.*, 2017) ⁽¹⁾. La surface de la feuille composée est mesurée en utilisant l'application **Easy Leaf Area** sur notre Smartphone, elle photographie la feuille et calcul automatiquement la surface suivant une échelle bien déterminée placée à côté de la feuille (une règle par exemple). La démarche suivie est décrite par Easlon and Bloom (2014) dans un article publié dans la revue **Applications in Plant Sciences** 2 (7).

$$SLA = \frac{\text{surface de la feuille}}{\text{masse sèche de cette feuille}} (m^2 \cdot kg^{-1}) \dots\dots\dots (1)$$

- Teneur en matière sèche foliaire LDMC: c'est un paramètre fonctionnel prédicteur de la production primaire nette (Smart *et al.*, 2017) et il est fortement corrélé avec la disponibilité des nutriments au niveau de l'écosphère. Cet indice a bénéficié d'une attention particulière dans la littérature d'écologie fonctionnelle (Brown et Anand, 2022). Les mêmes feuilles composées utilisées pour le calcul de la SLA sont utilisées pour la détermination de LDMC. Ce trait est un rapport entre le poids sec d'une feuille étuvée (en mg) et le poids frais (en g) de la même feuille (Smart *et al.*, 2017) ⁽²⁾.

$$LDMC = \frac{\text{masse sèche de la feuille}}{\text{masse fraîche de cette feuille}} (mg \cdot g^{-1}) \dots\dots\dots (2)$$

3.2.5. Traitement statistique des données

Les résultats obtenus dans cette partie pour toutes les variables étudiées ont subi une analyse statistique à l'aide du logiciel libre **R** (Ihaka et Gentleman, 1996). Les données expérimentales ont été traitées par une ANOVA à deux facteurs, cela est fait après vérification des conditions de la réalisation de ce type d'analyse qui sont : L'Indépendance des observations, Normalité des résidus (*Test de Shapiro*) et l'Homoscédasticité ou l'homogénéité des variances (*Test de Bartlett*). Les intervalles de confiance des résultats sont donnés pour une sécurité de 95 %.

Les différences des variables d'une espèce à l'autre ou d'un traitement à l'autre ont été comparées, en utilisant le test LSD (plus petite différence significative) au seuil 5 %.

3.3. Identification des besoins en nutrition minérale (fertilisation azotée)

3.3.1. Introduction

Les plantes qui se développent dans le milieu naturel saharien, dites xérophytes et éphémères, sont très peu ou pas exigeantes en matière de fertilisants. L'agriculture saharienne est une agriculture qui se déroule dans des sols sahariens squelettiques dépourvus de tous les éléments minéraux nécessaires pour les plantes cultivées. D'où la nécessité de mettre dans le sol – avec raisonnement – les besoins culturaux en éléments majeurs et mineurs après une étude approfondie des caractéristiques du sol et des exigences des plantes cultivées. En agriculture intensive (sous pivot), soit pour les céréales ou pour tout autre type de culture, un amendement minéral et/ou organique est plus que nécessaire.

3.3.2. Objectif de l'essai

Ce chapitre a pour objectif de préciser/déterminer les besoins et les doses optimales en éléments minéraux essentiels des trois populations du sulla provenant des régions du nord et cultivées pour la première fois dans la région de Ghardaïa, ainsi indiquer les limites à la réussite de ces cultures. Cela vu la pauvreté des sols sahariens en éléments essentiels pour l'agriculture (sols squelettiques). En premier lieu, nous voulons par cet essai de déterminer seulement les besoins en un élément majeur: **l'azote**. Nous avons laissé les autres éléments pour d'autres travaux et études car elles nécessitent des moments longs et des essais différents.

3.3.3. Plan expérimental

Avant d'installer une telle expérience de fertilisation minérale dans une marginale, nous devons tout d'abord essayer de vérifier les points de base suivants:

- * chercher et identifier les exigences en éléments minéraux du sulla, en consultant la bibliographie et les travaux réalisés dans le monde, surtout dans les pays qui ont introduit cette espèce fourragère dans leurs terres pour la première fois, tel que la Nouvelle Zélande et l'Australie...,
- * faire une analyse chimique appropriée du sol à cultiver pour confirmer la disponibilité ou l'absence d'un élément quelconque dans la rhizosphère pour éviter l'excès ou la carence qui a ses conséquences immédiates sur la culture (but économique et environnemental),
- * définir l'objectif à atteindre du rendement fourrager par unité de surface. D'après des expériences réalisées en Tunisie et au Maroc, pour produire 1 tonne de verdure de *Hedysarum coronarium* il faut utiliser 25u d'azote (N), 18,7u de phosphore (P_2O_5) et 25u de potassium (K_2O) (Ben Jeddi, 2005). Nous avons fixé l'objectif de 50 t/ha cela veut dire qu'il nous faut : 1250u de K_2O – 935u de P_2O_5 – 1250u de N par hectare.

Le dispositif expérimental choisi a été un Split Plot avec 3 répétitions (**Figure 14** et **Figure 15**).

- **F1** : 3 variants (populations)
 - **F2** : 3 niveaux (doses d'N)
- } 9 traitements
- Superficie totale de la parcelle expérimentale: 8m de large x 36m de longueur $\approx 300m^2$.
 - 3 répétitions $\rightarrow$ 3 blocs / 9 parcelles / 27 micro-parcelles.
 - Taille de la micro parcelle est de $4m^2$.
 - Espaces entre : blocs (3m) / parcelles (2m) / micro-parcelles (1m).

Bloc I

P1		P2		P3	D1
Espace entre parcelles					
P2		P3		P1	D2
Espace entre parcelles					
P3		P1		P2	D3

Bloc II

P3		P1		P2	D2
Espace entre parcelles					
P1		P2		P3	D3
Espace entre parcelles					
P2		P3		P1	D1

Bloc III

P2		P3		P1	D3
Espace entre parcelles					
P3		P1		P2	D1
Espace entre parcelles					
P1		P2		P3	D2

Figure 14 : Plan expérimental de l'essai

Bloc:

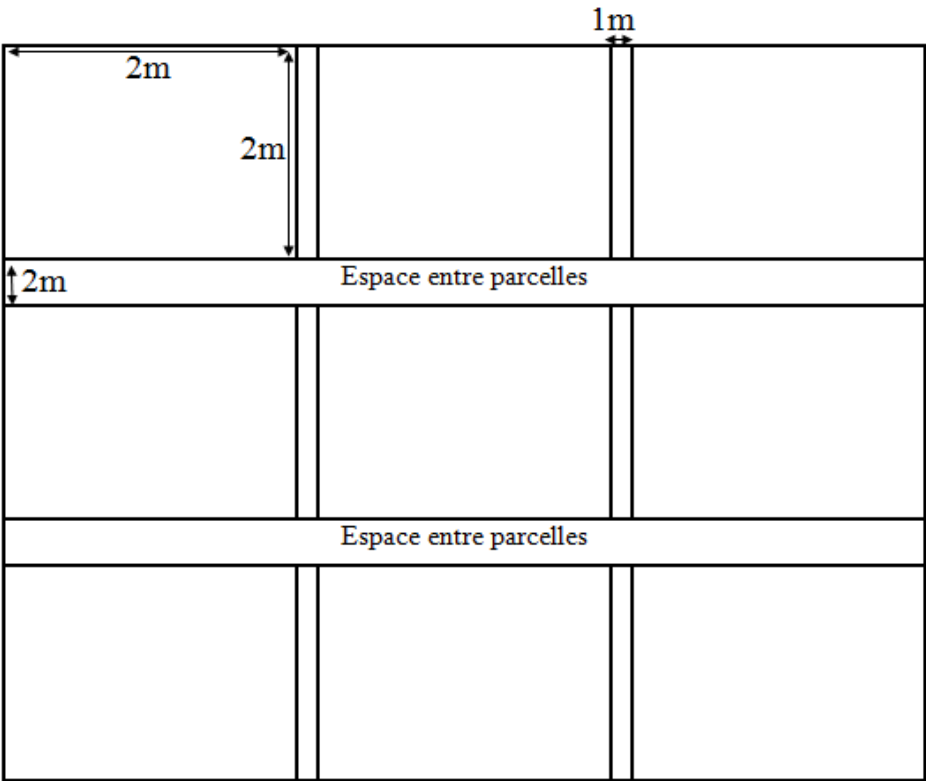


Figure 15 : Détails d'un bloc

Dans chaque micro-parcelle nous avons planté 16 plants avec un espace interligne et entreligne de 40cm. Avant cette plantation au champ, le semis a été réalisé à la main le 21/12/2018 dans des plaques à alvéoles pour maîtriser le nombre des plants levés et l'état sanitaire, et suivre aisément la croissance et le développement. Le nombre de grains semés est 300 graines par population.

En parallèle, sur le terrain, le sol a été préparé par un passage d'un outil à disque pour niveler le sol, et l'irrigation a été déclenché avant le semis (faux-semis) pour provoquer la germination et la levée des adventices, puis les détruire.

Après cette opération, nous avons divisé le terrain en parcelles et en micro-parcelles, en utilisant des tuteurs en palmes des palmiers et un cordon en plastique pour clôturer. Nous avons ainsi installé le système d'irrigation par aspersion (asperseurs et tuyauterie) qui couvre une superficie circulaire de 5 m de rayon ($d = 10$ m).

En terme des engrais minéraux utilisés, nous avons choisi 3 engrais différents: azoté, phosphaté et potassique : l'urée, le MAP et le sulfate de potassium respectivement pour compléter et compenser les besoins entre eux. L'épandage des engrais s'est fait à la main avant le semis, suivant la quantité désignée par les calculs (en utilisant une balance de terrain) (**Figure 16**).



Figure 16 : Préparation des parcelles expérimentales et épandage de engrais

🔗 Calcul des doses des engrais

Pour mettre la bonne quantité d'engrais, nous nous sommes référencié à un rendement de 50 tonnes par hectare (1250 kg de N – 1250 kg de K₂O – 935 kg de P₂O₅). Ensuite, nous avons essayé de varier les doses en azotes pour chercher la meilleure dose. Nous avons démarré par la formule de Ben Jeddi (2005): pour produire 1 tonne de verdure de sulla il faut épandre dans le sol 25 kg d'azote. A cet effet, nous avons choisi 3 doses différentes de l'azote:

12,5 kg ; 25 kg ; 37,5 kg

1 tonne de verdure → 25 U de N

50 tonnes de verdure → 1250 U de N

1250 U de N → 10000 m² (1 ha)

y₁ → 4 m² (micro-parcelle)

$$y_1 = (4 * 1250) / 10000 \rightarrow \boxed{y_1 = 0,5 \text{ U de N (pour 4 m}^2\text{)}}$$

1 tonne de verdure → 12,5 U de N

50 tonnes de verdure → 625 U de N

625 U de N → 10000 m² (1 ha)

y₂ → 4 m² (micro-parcelle)

$$y_2 = (4 * 625) / 10000 \rightarrow \boxed{y_2 = 0,25 \text{ U de N (pour 4 m}^2\text{)}}$$

1 tonne de verdure → 37,5 U de N

50 tonnes de verdure → 1875 U de N

1875 U de N → 10000 m² (1 ha)

y₃ → 4 m² (micro-parcelle)

$$y_3 = (4 * 1875) / 10000 \rightarrow \boxed{y_3 = 0,75 \text{ U de N (pour 4 m}^2\text{)}}$$

🔗 Suite des calculs

A/ Pour P₂O₅

Pour compléter les besoins du sulla en phosphore, on ajoute une quantité exacte d'un engrais phosphaté. Le choix est fixé pour le MAP (phosphate monoammonique : 12-52-0), mais pour toute quantité ajoutée de MAP, il y a une quantité d'azote de 12% est ajoutée systématiquement.

Donc, on doit commencer par l'épandage de l'engrais phosphaté:

1 tonne de verdure → 18,7 U de P₂O₅

50 tonnes de verdure → 935 U de P₂O₅

100 Kg de MAP → 52 Kg P₂O₅

$$x \text{ de MAP} \longrightarrow 935 \text{ Kg de P}_2\text{O}_5$$

$$x = (935 * 100) / 52 \rightarrow x = 1798,08 \text{ Kg de P}_2\text{O}_5$$

Où bien; 1798,08 Kg de MAP pour 1 ha.

Maintenant;

$$10000 \text{ m}^2 \longrightarrow 1798,08 \text{ Kg de MAP}$$

$$4 \text{ m}^2 \longrightarrow y$$

$$y = (4 * 1798,08) / 10000 \rightarrow y = 0,719 \text{ Kg de MAP par micro-parcelle}$$

Où bien; **719 g de MAP / 4m²**

● **Correction des doses** : notons que pour :

$$100 \text{ Kg de MAP} \longrightarrow 12 \text{ Kg de N} \quad \text{où bien}$$

$$1 \text{ Kg de MAP} \longrightarrow 0,12 \text{ Kg de N} \quad \text{où bien}$$

$$1000 \text{ g de MAP} \longrightarrow 120 \text{ g de N}$$

Donc, dans 719 g de MAP combien y-a-t- il de l'azote?

$$100 \text{ Kg de MAP} \longrightarrow 12 \text{ Kg de N}$$

$$0,719 \text{ Kg de MAP / micro-parcelle} \longrightarrow q \text{ Kg de N}$$

$$q = (0,719 * 12) / 100 \rightarrow q = 0,093 \text{ Kg de N par micro-parcelle}$$

Où bien; **93 g de N / 4m²**

B/ Pour K₂O

Pour compléter les besoins du sulla en potassium, on ajoute une quantité exacte d'un engrais potassique. Le choix est fixé pour le sulfate de potassium (0-0-52).

$$1 \text{ tonne de verdure} \rightarrow 25 \text{ U de K}_2\text{O}$$

$$50 \text{ tonnes de verdure} \rightarrow 1250 \text{ U de K}_2\text{O}$$

$$100 \text{ Kg de sulfate de potassium} \longrightarrow 52 \text{ Kg K}_2\text{O}$$

$$x \text{ de SOP} \longrightarrow 1250 \text{ Kg de K}_2\text{O}$$

$$x = (1250 * 100) / 52 \rightarrow x = 2403,85 \text{ Kg de K}_2\text{O}$$

Où bien; 2403,85 Kg de SOP pour 1 ha.

Maintenant;

$$10000 \text{ m}^2 \longrightarrow 2403,85 \text{ Kg de SOP}$$

$$4 \text{ m}^2 \longrightarrow y$$

$$y = (4 * 2403,85) / 10000 \rightarrow y = 0,961 \text{ Kg de SOP par micro-parcelle}$$

Où bien; **961 g de SOP / 4m²**

Pour l'engrais sulfate de potassium, le problème de correction de la dose en azote n'existe pas parce que cet engrais ne contient aucune quantité d'azote (0%).

🔧 Ajustement de la dose d'azote par un engrais azoté simple

D'après les calculs précédents, la quantité apportée d'azote par la dose standard de MAP est de 0.093Kg. Donc, il nous faut soustraire cette quantité de la dose de l'engrais azoté:

D1 = 0.25 Kg d'N ➔ la quantité à ajouter = $0.25 - 0.093 = 0.157$ Kg d'N.

D2 = 0.50 Kg d'N ➔ la quantité à ajouter = $0.50 - 0.093 = 0.407$ Kg d'N.

D3 = 0.75 Kg d'N ➔ la quantité à ajouter = $0.75 - 0.093 = 0.657$ Kg d'N.

Pour cet ajustement, nous avons choisi l'urée (engrais simple) pour compenser la dose d'azote. Les quantités ajoutées de cet engrais sont les suivantes:

■ Pour D1 = 0.157

100 Kg d'urée ➔ 46 Kg de N

N1 ➔ 0.157 Kg de N

$N1 = (0.157 * 100) / 46$ N1 = 0.341 Kg de l'urée ➔ N1 = 341 g de l'urée

■ Pour D2 = 0.407

100 Kg d'urée ➔ 46 Kg de N

N1 ➔ 0.407 Kg de N

$N1 = (0.407 * 100) / 46$ N1 = 0.885 Kg de l'urée ➔ N1 = 885 g de l'urée

■ Pour D3 = 0.657

100 Kg d'urée ➔ 46 Kg de N

N1 ➔ 0.657 Kg de N

$N1 = (0.657 * 100) / 46$ N1 = 1.428 Kg de l'urée ➔ N1 = 1428 g de l'urée

3.3.4. Caractérisation agronomique du sulla cultivé (paramètres mesurés)

Un suivi bien organisé a été effectuée le long du cycle des plantes, depuis la germination-la levée jusqu'à la floraison. Pendant cette période, un ensemble de paramètres de croissance et de développement est réalisé: les paramètres morphologiques telle que la croissance en hauteur, nombre de feuilles, nombre de tiges (ramification) ; paramètres du reproduction à savoir le nombre de gousses par plante et le nombre d'articles par gousse ; et à la fin du cycle végétatif la mesure d'un ensemble des paramètres de production tel que la biomasse fraîche, la biomasse sèche, rapport entre les feuilles et les tiges... entre les populations et entre les parcelles et cela après l'arrachage de la plante entière. L'arrachage des plantes a été effectué le matin pour éviter les températures excessives trop élevée, et cela le mois d'avril 2019 (12/04/2019). Les plantes de la même population et de la même dose d'azote sont regroupées en un seul groupe.

Le comptage des paramètres est réalisé au sein du laboratoire de la SRPV de *Lachbour* – Ghardaïa. Le séchage des échantillons a été effectué à l'étuve (70° C pendant 48h) de la même station.

3.3.5. Traitement statistique des données

Le traitement des données a été effectué par le logiciel libre R (version 4.0.0). Il a servi à l'analyse de la variance à deux critères de classification.

Nous avons utilisé le test de NEWMAN et KEULS au seuil de 5% pour comparer les moyennes des variables étudiées afin de déterminer les groupes homogènes quand il existe une différence significative entre les traitements.

3.4. Essai d'inoculation des plantes du sulla et conduite de la culture (en hors sol): inoculation indirecte

3.4.1. Introduction

Les espèces appartenant à la famille des légumineuses (fabacées) sont connues par leur aptitude de former des nodules au niveau de leurs racines, qui sont formées d'une symbiose plante – bactérie spécifique. Ces bactéries spécialisées sont: les rhizobia et la plupart des rhizobia décrits dans les sols agricoles appartiennent au groupe des α -protéobactéries, genres *Rhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Mesorhizobium* et *Ensifer* (Vincent, 2018). Ces bactéries ont la capacité de fixer l'azote atmosphérique (N_2) de l'air, et de le transférer à la plante hôte sous forme d'azote assimilable (NH_4^+). Cette option est très intéressante de point de vue agronomique, économique et écologique, elle va nous aider à minimiser ou même supprimer l'utilisation des engrais chimiques dans les systèmes de production agricole. Donc, il est nécessaire d'y aller vers la recherche de la symbiose fixatrice d'azote, parce que l'application excessive des fertilisants amène à des impacts négatives sur l'écosystème (Xiaochen *et al.*, 2020). Signalons que cette fixation symbiotique est affectée par les conditions environnementales extrêmes, telles que la sécheresse, la salinité, pH élevé ou faible, les éléments toxiques, températures trop élevées ou très basses... (Sprent et Gehlot, 2010).

3.4.2. Objectif de l'inoculation

Vu l'intérêt agro-écologique de la nodulation chez les légumineuse fourragères et même alimentaires sur l'amélioration de la production en fourrage et en graines riches en protéines d'un côté, et les résultats obtenus en 2014 d'un autre côté, où nous avons enregistré l'absence totale des nodules au niveau des racines des plantes de *Hedysarum coronarium* cultivées dans la région de Ghardaïa, la chose qui signifient l'inexistence absolue du rhizobium spécifique dans ces sols, nous avons réfléchi

de réaliser une inoculation des racines des plantes pour chercher si l'inoculum spécifique de ces espèces peut vivre et persister dans les conditions climatiques et édaphiques de la région d'étude.

3.4.3. Méthode adoptée et protocole expérimental

A l'état naturel, l'infection racinaire par une souche du rhizobium se fait naturellement dans un stade bien déterminé de la croissance de la plante. L'étape clé de cette opération est la présence du rhizobium spécifique à l'espèce légumineuse cultivée dans la rhizosphère. Mais lorsque ce rhizobium est absent ou inefficace, on adopte à une inoculation artificielle. Cette inoculation est de 2 types : inoculation directe et inoculation indirecte.

Nous avons adopté dans cette expérience la méthode indirecte, vu sa simplicité et la facilité de réalisation. Elle ne nécessite ni un laboratoire ni un matériel spécifique, seulement des échantillons du sol collectés de quelques régions différentes habitats de ces espèces cultivées.

Nous avons ramené 3 échantillons du sol :

El-Tarf et Sétif (**S36** et **S19**): au motif qu'ils sont des habitats naturels du *H. coronarium* et *H. carnosum* collecté le mois du juin 2021, et Tizi-Ouzou (**S15**): au motif que c'est une zone de dispersion de *H. flexuosum* offert par le laboratoire de Biochimie Analytique et Biotechnologies (LABAB) de l'université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou «UMMTO» le mois du septembre 2021. Ces échantillons ont servi pour la réalisation d'un essai expérimental pour inoculation des 3 espèces étudiées du sulla (*H. coronarium*, *H. carnosum* et *H. flexuosum*).

Cet essai est réalisé dans des sachets agricoles perforés de 20 cm de diamètre supérieur, 15 cm de diamètre inférieur et 30 cm de hauteur, sous des conditions semi-contrôlées (à la température ambiante), pour éviter les aléas climatiques surtout les vents de sable dominants dans cette période de l'année.

Nous avons rempli les sachets par 3 substrats différents: la terre végétale (sable des crues des oueds riche en éléments minéraux), le terreau commercial (pour la rétention de l'eau), le sol du nord contenant le rhizobium du sulla (**S19**, **S15**, **S36**).

Nous avons mis dans chaque sachet un mélange de : 1/2 de la terre végétale, 1/4 du terreau, 1/4 du sol du nord.

Dans le même jour du semis, les sachets sont répartis sur les espèces du sulla sont réparties sur les traitements correspondants selon un essai factoriel (**Tableau 12**) :

Facteur1 : 3 espèces de Sulla : *H. carnosum* (**H1**), *H. flexuosum* (**H2**) et *H. coronarium* (**H3**).

Facteur 2 : 3 types du sol : sol du Sétif (**S19**), sol du Tizi-Ouzou (**S15**) et sol d'El-Tarf (**S36**).

Répétitions : 3 répétitions pour chaque traitement.

Signalons que pour le Facteur 2, nous avons éliminé le 4^{ème} variant qui est le sol de Ghardaïa (S47) parce que le résultat final est connu dès le début (absence du rhizobium).

Tableau 12 : Dispositif expérimental adopté

H1 – S36	H2 – S15	H3 – S19	H1 – S15	H2 – S36	H2 – S19	H3 – S19	H1 – S19	H1 – S15
H1 – S19	H2 – S36	H3 – S15	H2 – S15	H1 – S19	H3 – S19	H2 – S15	H3 – S15	H2 – S19
H1 – S15	H2 – S19	H3 – S36	H3 – S36	H3 – S15	H1 – S36	H1 – S36	H2 – S36	H3 – S36

Le semis a été réalisé manuellement le 06/01/2022, nous avons mis 5 graines de chaque espèce dans un sachet en suivant le protocole précédent. Tous les sachets semés sont maintenus à 90% RU par irrigation à l'eau de robinet durant la période entre le semis et le début de la floraison (le moment d'arrachage des plants et observation des racines). A la levée, nous avons éclaircis les plants, 3 plantes par sachet sont maintenues pour la poursuite de l'essai.

Au stade début floraison, le sachet a été coupé pour libérer la motte qui contient la plante et son système racinaire. A la main, les racines sont déterrées soigneusement pour ne pas endommager les nodules, et les racines sont séparées de la partie aérienne au niveau du collet et ensuite trempées dans l'eau pendant un petit moment puis elles ont subi un lavage intense mais doux à l'eau de robinet pour enlever le reste du sol qui est collé sur les racines. Après cela, on procède au comptage des nodules en suivant les racines une-par-une, en cas de nécessité nous avons utilisé un biloculaire. Ainsi les données de la hauteur des plantes (HT), la longueur des racines (LR) ont été enregistrées.

3.4.4. Traitement statistique des données

A la fin de cette étude, nous avons compté le nombre de nodules existant au niveau des racines de chaque plante et de chaque traitement. Le nombre total des racines vérifiées est de 80 mesures.

Toutes les données brutes obtenues sont analysées statistiquement à l'aide du logiciel **R** (version 4.0.0). Les valeurs obtenues sont la moyenne statistique de 3 répétitions avec un intervalle de confiance calculé au seuil de 5%. Le nombre des nodules trouvés est testé par une analyse de la variance (ANOVA) à deux facteurs (origine du sol, espèce du sula). Ainsi, le test de *Student Newman et Keuls* est utilisé au seuil de 5% pour comparer les moyennes des variables étudiées afin de déterminer les groupes homogènes quand il existe une différence entre les moyennes.

3.5. Contribution à l'étude de la composition chimique des trois espèces fourragères cultivées du sulla

3.5.1. Introduction

La production animale est liée principalement à la qualité fourragère et nutritive qui dispose une telle ou telle plante. La composition chimique d'une plante est considéré le facteur principal qui reflète la valeur nutritive et zootechnique de cette espèce, et la permet d'être utilisée comme fourrage vert pour surtout la production laitière. Plus qu'une plante est riche en azote, en protéines brutes, en minéraux totaux, en métabolites secondaires... et pauvre en cellulose par exemple plus qu'elle attirée et broutée par les animaux d'élevage (espèce végétale de haute qualité fourragère). Les légumineuses fourragères jouent un rôle principal pour l'alimentation animale parce qu'elles fournissent des protéines pour le régime des ruminants (Benyoussef *et al.*, 2016).

Les légumineuses fourragères sont des espèces qui vivent en symbiose avec des bactéries (ex. rhizobium), une richesse très remarquable de ces espèces en azote et en protéines synthétisées au niveau des feuilles. Ces protéines foliaires ont une solubilité très élevée pouvant conduire à une dégradation accélérée dans le rumen des ruminants jusqu'à l'obtention de l'ammoniac, donc cela conduit à une perte considérable d'azote alimentaire sous forme urinaire (Aufrère *et al.*, 2012). A ce niveau-là, les tannins condensés interviennent et jouent un rôle très intéressant pour minimiser les problèmes gastriques signalés chez les animaux d'élevage (météorisation gazeuse et spumeuse /ballonnement, parasites intestinales) qui peuvent conduire à la mort de l'animal par asphyxie (Bareille *et al.*, 2019) . Dans ce contexte, les plantes fourragères sont généralement considérées comme des plantes météorisantes, mise-à-part quelques espèces qui sont non- météorisantes à savoir si elles renferment des TC (lotier, sulla...) ou non (luzerne, trèfle) (Aufrère *et al.*, 2012).

Dans le cas contraire, le fourrage est constitué de quelques matières qui ne sont pas intéressantes pour les animaux : la cellulose par exemple. La cellulose est un principal constituant de la paroi des cellules végétales, il appartient au groupe des polysaccharides. Selon Ben Jeddi (2005), la valeur nutritive d'un fourrage se trouve en corrélation négative avec sa richesse en cellulose; autrement dit, plus que la teneur en cellulose brute est élevé dans la matière sèche d'un végétal plus que cette plante est moins digestible. Cette cellulose est dégradée dans le tube digestif de l'animal par des enzymes des bactéries et la présence de la lignine non digestible est considérée comme une barrière physique réelle pour la dégradation de la cellulose (Reenu *et al.*, 2022). D'une manière générale, une espèce fourragère contenant une teneur élevée en eau, énergie, carbohydrates... et une teneur faible à moyenne en protéines et en fibre est considérée plus palatable et digestible; ainsi elle peut être même cultivée avec rentabilité dans un sol dégradé (Kumar *et al.*, 2021).

Pour profiter de toutes ces caractéristiques, on est obligé de faire (connaître) la composition chimique d'une telle plante fourragère destinée à l'alimentation de bétail en passant par des analyses fourragères. Une analyse fourragère va nous donner la valeur nutritive qui doit être déterminée au laboratoire par une analyse chimique (Guerin, 1999). Elle est achevée par deux types de valeurs : *valeurs mesurées* (passage par la détermination et le dosage au laboratoire) et *valeurs calculées* (à travers des équations et à partir des valeurs mesurées).

3.5.2. Objectif de l'étude

Pour décider d'utiliser une espèce fourragère nouvelle dans l'alimentation de bétail, et pour bien profiter de ces avantages, et ainsi éviter les problèmes causée par cette plante dans le domaine de la production animale, il faut chercher à identifier ses caractéristiques chimiques, zootechniques et alimentaires en passant par des analyses chimiques appropriées et approfondies. Dans ce contexte s'intègre l'axe de cette recherche, et le but principal de cette étude est d'introduire le matériel végétal du sulla cultivé pour la première fois dans la région de Ghardaïa dans le laboratoire pour vérifier sa qualité fourragère acquise et, par la suite, faire une comparaison avec le sulla du nord spontanée dans son habitat naturel ou celle cultivée dans les étages bioclimatiques humides.

3.5.3. Analyses biochimiques et fourragères effectuées

A la fin de l'expérimentation conduite dans la campagne agricole 2020/2021 présentée dans la partie 3.2., nous avons réalisé des analyses biochimiques du matériel végétal recueilli pour identifier les caractéristiques fourragères des trois espèces du sulla (*H. coronarium*, *carnosum*, *flexuosum*).

Six mois après le démarrage de la végétation, l'arrachage de toutes les plantes a été effectuée en préservant le système racinaire. Après évaluation de tous les paramètres biométriques et agronomiques visées par la partie citée précédemment, nous avons mélangé ensemble les plantes issues des différents micro-parcelles et qui appartiennent à la même espèce, afin d'obtenir 3 groupes de plantes de sulla (3 échantillons) vu l'inexistence de différences entre ces unités expérimentales.

Au cours de cette thèse, nous avons seulement choisi quelques paramètres à analyser pour simplement voir la valeur nutritive de sulla tandis que nous ne sommes pas des spécialistes en biochimie et en zootechnie. Ces paramètres sont les suivant:

❖ ■ Matière azotée totale (MAT) / Protéines brutes:

L'azote total est déterminé par la méthode de Kjeldalh (1883). Ensuite, la teneur en matière azotée totale MAT ou protéines est calculée en appliquant la formule suivante: $MAT = N\% \times 6.25$ en tenant en compte que les protéines végétales sont constituées en moyenne de 16% d'azote. Cette

valeur est exprimée en pourcentage de la matière sèche. Après la détermination de la matière sèche des plantes, un échantillon de la matière végétale séchée à l'étuve à 105°C pendant 24h puis broyé pour avoir de la poudre est utilisé pour l'analyse de l'azote en passant par les 3 étapes connues : minéralisation, distillation puis titrage.

❖ ■ Tannins condensés (TC):

Les tannins condensés sont des composés phénoliques, ils se trouvent dans toutes les parties aériennes et mêmes souterraines de la plante (Aufrère *et al.*, 2012; Hussain *et al.*, 2020). Une plante riche en tannins condensés est une plante bénéfique pour les ruminants, parce qu'elle empêche le ballonnement de l'estomac par des gaz qui peuvent même conduire à la mort de l'animal, cela est expliqué par la liaison tannins-protéines créée au moment de la digestion qui empêche les protéines de se dégrader. Ainsi, ces TC améliorent considérablement la valeur nutritive d'un fourrage conservé (ensilage, enrubannage).

La majorité des protocoles de dosage des tannins sont basées sur leur aptitude de se lier avec les protéines en formant des complexes (Scalbert *et al.*, 1989). Mais, ils ne font pas la distinction entre les tannins, car ces derniers sont divisés en deux groupes : tannins condensés (proanthocyanidines) et les tannins hydrolysables (Kumar Das *et al.*, 2020). D'après Ben Moussa *et al.* (2022), il y a plusieurs méthodes pour faire un dosage des tannins condensés. Dix méthodes analytiques peuvent être utilisées pour ce dosage (Schofield *et al.*, 2001). Le principe est basé sur la fixation du groupement aldéhydique de vanilline sur le carbone 6 du cycle A de la catéchine (Tlili *et al.*, 2020).

La teneur en tannins condensés est déterminée par la méthode de Scalbert 1989 (Ben Moussa *et al.*, 2022): un échantillon de la plante séché à l'étuve, puis broyé et tamisé par une passoire de 1 mm. On prend 3g de la poudre dans un bécher puis on ajoute 40 ml de méthanol et on le laisse à 25°C pendant 48h. On filtre les macérâts dans un Büchner, puis transférés dans des ballons initialement pesés (P_0) et le filtrat reçoit une réextraction (2^{ème} fois), en utilisant à chaque fois 20 ml de méthanol. L'extrait obtenu est ensuite évaporé à 40°C. Ensuite, on ajoute une prise de volume de 200 μ L des extraits (dilué au 1/10^{ème} dans le méthanol) à 2 mL d'une solution aqueuse ferreuse acide (77 mg de $\text{FeSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$ dissoute dans 500 mL de HCl / Butanol (2/3)). Puis, une incubation de la solution dans un bain marie pendant 15 min. et en fin, on mesure l'absorbance par un spectrophotomètre à une longueur d'onde de 530 nm contre un blanc. La concentration est exprimée en milligramme d'équivalent de cyanidine par gramme de matière végétale sèche (mg d'EC/g MVS). La teneur en tanins condensés a été calculée en utilisant la formule suivante:

$$\text{mg d'EC/g MVS} = \frac{\text{Abs} \times V \times D \times M \times V2}{l \times \varepsilon \times v \times m}$$

Abs : Absorbance de l'échantillon à $\lambda = 530 \text{ nm}$;	l : Longueur du trajet (cm) ;
V : Volume total de réaction (mL) ;	ϵ : Coefficient d'extinction molaire (34700 L/mol/cm);
D : Facteur de dilution ;	v : Volume de l'extrait dilué 10 fois ;
M : Masse molaire de la cyanidine (g/mol) ;	m : Masse de la matière sèche (g).
V2 : Volume de l'extrait avant dilution (mL) ;	

❖ ■ Cellulose brute:

La cellulose brute est utilisée pour estimer la qualité des productions d'origine agricole sur le principe qu'il s'agit de la fraction non digestible. La teneur en azote libre est calculée par différence entre les hydrates de carbone moins la cellule brute (Möller, 2014).

La cellulose brute est déterminée par la méthode de Weende (1867). Ce dosage est représenté par deux sous-formes analysées : l'holocellulose (principalement cellulose et hémicellulose) et l' α -cellulose (Sorbier, 2015). La démarche suivie et le mode opératoire de cette analyse est la suivante (Letellier et Fleurent-Didier, 2012 ; SRC, 2004):

- les échantillons sont broyés et tamisés à 1mm.
- peser 1g de l'échantillon dans un creuset filtrant (**PE**). Réaliser 3 répétitions pour chaque plante.
- positionner les creusets dans l'appareil de dosage des fibres, puis ajouter 150 ml de la solution d'acide sulfurique 0,255 N.
- porter le tout à ébullition pendant 30 minutes.
- une fois le temps d'hydrolyse écoulé, éliminer le surnageant par filtration et laver le résidu au moins trois fois à l'eau distillée bouillante.
- après le rinçage, ajouter au résidu 150 ml de solution de soude 0,313 N et porter à ébullition une autre fois pendant 30 minutes, puis filtrer et rincer comme précédemment.
- placer les creusets à l'étuve à 103°C pendant environ 17 heures.
- peser après refroidissement (20 minutes dans un dessiccateur) : **P1**.
- calciner dans un four à 550°C pendant 5 heures (1^{ère} montée en température jusqu'à 250°C, palier de 1 heure, puis 2^{ème} montée en température jusqu'à 550°C, palier de 5 heures).
- à la sortie du four, placer les creusets environ 1 heure dans l'étuve à 103°C avant de les laisser refroidir dans le dessiccateur et de les peser (**P2**).

$\text{Cellulose Brute (\%)} = [(P1 - P2) / PE] \times 100$

La teneur en CB correspond à la différence entre le poids après passage à l'étuve et celui obtenu après incinération (Le Gall *et al.*, 2011).

❖ ■ Flavonoïdes et polyphénols

La détermination des teneurs en phénols totaux et flavonoïdes est précédée par l'extraction de la matière végétale:

Extraction. 1g de la MV sèche broyée est utilisé pour l'extraction pendant 24h avec 50 ml d'éthanol (70% : v/v) dans la température ambiante. Après, on élimine l'éthanol sous pression réduite à l'aide d'un évaporateur rotatif à 40°C. Le reste de la solution aqueuse est traité deux fois par éther de pétrole pour éliminer les graisses. La solution lyophilisée est extraite par l'acétate d'éthyle à la présence d'une solution aqueuse de 20% de sulfate d'ammonium et 2% de l'acide métaphosphorique. Ensuite, la fraction d'acétate d'éthyle est séchée en ajoutant une quantité suffisante de sulfate de sodium anhydre puis évaporé à sec sous évaporateur rotatif. Le précipité est séché, dissous dans 5 ml de méthanol absolu puis conservé à -20°C (Djeridane *et al.*, 2006).

Dosage des polyphénols totaux. Les polyphénols sont estimés par la méthode de Folin–Ciocalteu. Un volume de 100 µL de chaque échantillon extrait est ajouté à 2 ml du réactif de Folin Ciocalteu dilué 10 fois, laissé incubé à la température ambiante pendant 5 min. Après ce délai, on ajoute à la solution 2 ml de carbonate de sodium (Na_2CO_3 : 75g/l). Le mélange est incubé pendant 2 heures à la température ambiante (ou à 50°C pendant 15 min). L'absorbance va être déterminé à 760 nm à l'aide d'un spectrophotomètre. Les concentrations en polyphénols sont estimées à partir des gammes d'étalonnage établies avec l'acide gallique (0–1,2 mg/ml) et sont exprimées en milligramme d'équivalent d'acide gallique par gramme d'extrait (mg EAG/g) (Djeridane *et al.*, 2006 ; Tlili, 2015; Tlili *et al.*, 2020 ; Djemaa-Landri *et al.*, 2021).

Dosage des flavonoïdes. La détermination des flavonoïdes est réalisée par la méthode décrite par Djeridane *et al.* (2006). La méthode est basée sur la formation d'un complexe flavonoïde-aluminium, qui a une absorbance spectrophotométrique à λ_{max} de 430 nm. La solution est composée de 1 ml de chaque extrait-échantillon et du standard (préparée dans le méthanol) sont ajoutés à 1 ml d' AlCl_3 (2% dans le méthanol) puis incubé pendant 10 min puis passé à la lecture. Les concentrations des flavonoïdes ont été déduites à partir de la gamme de la courbe d'étalonnage établie avec la rutine (0-35 µg/ml). Les résultats sont exprimés en milligramme d'équivalent de rutine par gramme d'extrait mg ER/g (Djeridane *et al.*, 2006 ; Tlili, 2015 ; Tlili *et al.*, 2020 ; Djemaa-Landri *et al.*, 2021).

3.6. Inventaire de l'entomofaune associée et des maladies observées sur la culture du sulla

3.6.1. Introduction

La production végétale, en général, est toujours affectée par des attaques parasitaires et non parasitaires parce qu'elles sont soumises à des facteurs biotiques et abiotiques. Ces derniers limitent la croissance et la productivité des plantes. La production fourragère en zones arides et hyper-arides et même oasisienne n'est pas une pratique facile à maîtriser car les conditions climatiques et édaphiques sont très propices au développement parfois fulgurant de multiple bio-agresseurs (ravageurs et agents pathogènes causant des maladies), ainsi à la manifestation des maladies non parasitaires. Notons que plusieurs causes ont participé à rendre les plantes cultivées dans des champs (alimentaires, fourragères, industrielles...) plus sensibles aux ravageurs que la flore autochtone, la chose qui ronge par conséquent une propagation inévitable des parasites (Mansouri, 2021).

Les dégâts causés par l'entomofaune sur les cultures fourragères sont non négligeables, par contre les études portant sur la connaissance de la bio-écologie de ce cortège faunistique en Algérie restent limitées et non satisfaisantes et sont généralement assez localisées et portant sur des taxons limités. Par ailleurs, nous pointons que la faune des fourrages en Algérie est mal connue et très peu d'études ont été réalisés sur ce sujet.

3.6.2. Objectif de l'étude

Le sulla est une plante, comme tout autre type de plantes des systèmes naturels et/ou artificiels, qui peut être attaquée par des prédateurs ou des bio-agresseurs.

Etant donné le sulla est cultivée pour la première fois dans la région d'étude, et en vue de la caractérisation agronomique des espèces cultivée vient s'inscrire ce volet de recherche.

Le but principal de cette étude est de chercher d'identifier les principaux ennemis de la culture des trois espèces du sulla cultivées dans l'écorégion de Ghardaïa.

3.6.3. Protocole expérimental // démarche suivie

Dans cette étude, nous avons exploité le plan expérimental décrits dans la partie 3.2. de l'année 2020/2021. Sur les parcelles expérimentales, nous avons installé le matériel nécessaire pour le captage des spécimens (insectes et autres) associés à la culture des trois espèces cultivées du sulla. Au milieu de chaque micro-parcelle cultivée d'une espèce se trouve un outil de captage.

Nous avons utilisé des pots de Barber enterré dans le sol pour piéger les arthropodes et des assiettes jaunes pour attirer les insectes; où se trouve un petit volume d'eau mélangée avec un détergent pour éviter le déplacement et le saut des individus capturés.

Ce matériel de captage est laissé en places pendant 5 jours successifs, puis le contenu est versé dans des flacons libellés et numérotés contenant de l'alcool (éthanol à 70%) pour préserver les insectes et les protéger contre la dégradation.

3.6.4. Traitement des individus capturés

En premier lieu, nous avons regroupé les flacons en 3 groupes suivant les espèces du sulla cultivée, et chaque groupe est séparé en 2 selon la méthode de récolte. Puis, nous avons trié le contenu de chaque flacon collecteur séparément au sein du même groupe en observant les individus répétitifs sous la loupe binoculaire afin d'arriver à 3 flacons collecteurs seulement pour chaque type de récolte. Ensuite, chaque flacon collecteur est traité tout seule. Le contenu est versé sur une boîte de Pétri en plastique, les individus ont été prélevés soigneusement à l'aide d'un pinceau et transférés vers une autre boîte pour qu'ils seront débarrassés des débris accrochés à leurs appendices ou fixés sur les téguments (pattes, ailes, antenne...).

3.6.5. Détermination des espèces capturées

L'identification et la détermination des espèces collectées du terrain est une opération délicate et destine, elle repose essentiellement sur une bonne observation et un guide d'orientation. Pour cette opération, nous nous sommes référé à un type numérique de clés d'identification spécifique à l'aide d'un ingénieur spécialisé en phyto-protection du laboratoire de la SRPV de Ghardaïa:

Site web spécialisé pour la détermination:

Pour une identification générale et débutante, nous avons essayé de se baser sur nous-même en s'aidant par un simple site Internet pour initier la reconnaissance des espèces collectées:

<https://quelestcetanimal-lagalerie.com/liste-des-cles-de-determination/?fbclid=IwAR3nZMdmAQX8XFK5DzHK9PFHTIlr0eXM1ptL7gwyr3gMuZe3Wq6OQ8w6R0> (**Figure 17**).



Figure 17 : Interface de site utilisé pour l'identification

Notons que la détermination effectuée pour quelque échantillon nous a aboutis jusqu'à l'espèce (l'obtention du nom spécifique), alors que pour les autres nous avons arrêté au niveau de l'ordre ou de la famille.

3.6.6. Détermination des maladies attaquant le sulla cultivé dans la région

❖ 3.6.6.1. Objectif de l'étude

Nous voulons par ce chapitre de chercher les maladies qui attaquent la culture du sulla dans la région de Ghardaïa, après que nous avons présenté l'entomofaune associé à cette culture dans le chapitre précédent (les insectes surtout). Nous voulons dire par ces maladies les infections cryptogamiques, bactérienne et virales qui peuvent se manifester sur cette nouvelle culture, parce que nous savons que l'introduction des nouvelles espèces et/ou techniques culturales dans un périmètre agricole est considéré un suspect fort et est à l'origine de l'émergence des maladies que ne sont pas connues auparavant dans cette région.

A cet effet, nous avons conduit notre étude en 2 volets : sur le terrain et au laboratoire.

- **Sur le terrain** (dans une serre semi-automatique): nous avons semé les 3 espèces de sulla dans des pots agricoles, à raison de 5 graines par espèce dans chaque pot à une profondeur de 2cm. Pour chaque espèce, nous avons préparé 3 pots soit trois répétitions par espèce (**Figure 18**).



Figure 18 : Mise en culture sur des pots des trois espèces du sulla dans la serre de l'université de Ghardaïa

- **Au laboratoire:** dans un laboratoire de Mycologie de l'université de Ghardaïa, nous avons mené notre expérience qui a pour objectif d'étudier les maladies et les champignons auxquels les graines de sulla sont exposées. Cette idée est venue après que nous avons remarqué des attaques sur les plants levés dès les premiers jours après le semis (**Figure 19**), qui manifestent des symptômes ressemblants à des attaques cryptogamiques.



Figure 19 : Symptômes observés sur les plants du sulla après la levée

Cette partie est subdivisée en deux étapes:

1/ nous avons réalisé un essai au laboratoire (mars 2022) pour vérifier la présence et/ou l'absence d'une germe sur le matériel végétal de départ (les graines) (**Figure 20**) :



Figure 20 : Mise en culture des graines du sulla sur un milieu nutritif

2/ nous avons répété la même expérience au laboratoire (avril 2022 : après la levée des plantes) pour vérifier l'existence des champignons nuisibles sur les différentes parties végétales de notre matériel végétal (feuille, tige, fleurs, racine) (Figure 21):

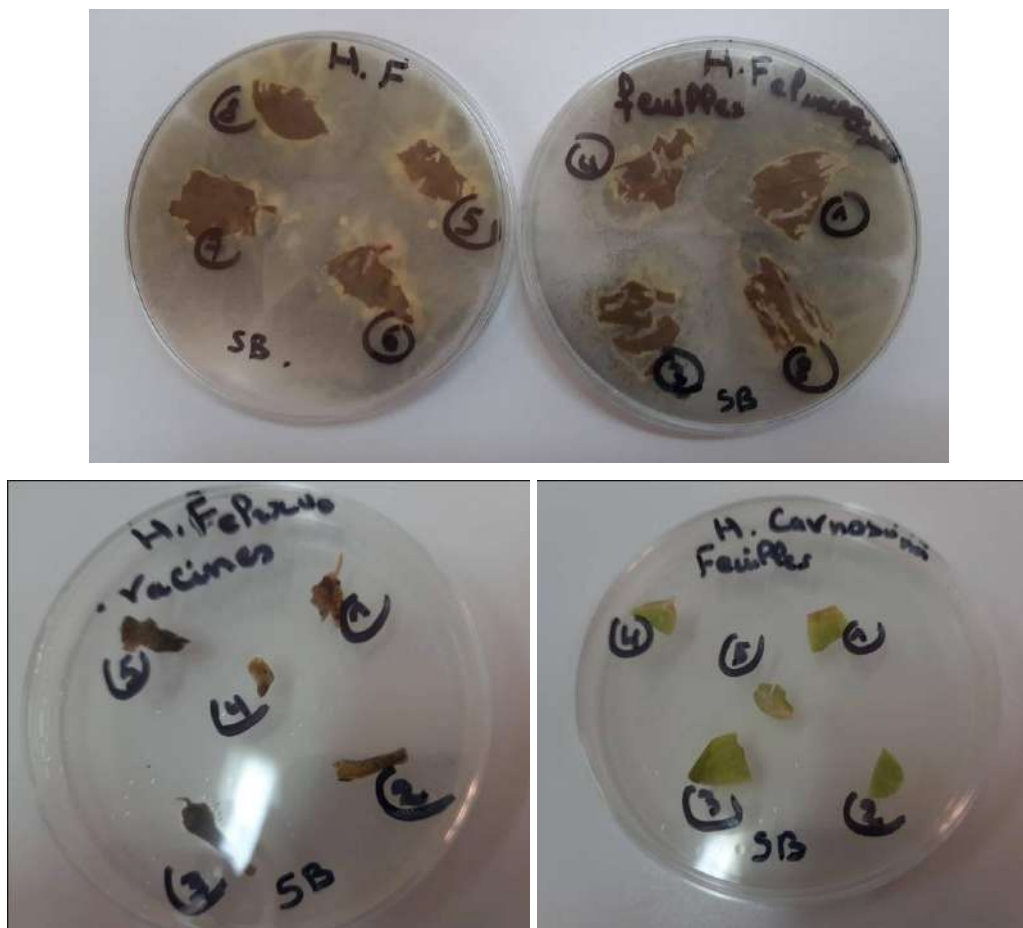


Figure 21 : Mise en culture des organes végétatifs du sulla sur un milieu nutritif

❖ 3.6.6.2. Mode opératoire

La réalisation d'une étude cryptogamique sur un matériel biologique est une opération très délicate, elle nécessite une intention particulière et un protocole strict. Dans les lignes suivantes, nous présentons les différentes étapes de cette manipulation:

A- Stérilisation du milieu de travail pour éviter toute sorte de contamination: nous avons utilisé l'eau de Javel, puis nous avons ainsi allumé le bec Bunsen (stérilisation de l'espace de travail);

B- Décongélation de milieu de culture *Sabouraud* (un milieu d'isolement des Fungi);

C- Stérilisation des graines du sulla et des parties végétatives: dans une solution aqueuse constituée de 2,5 ml de l'eau de Javel + 5 ml d'eau distillée et pendant 1 minute nous avons plongé les semences : le but de cette stérilisation de surface est d'éliminer toutes sortes de pollutions externes d'origines fongiques ou bactériennes. Nous avons répété le même travail pour la désinfection des racines, feuilles, fleurs...;

D- Mettre les graines du sulla dans un bécher contenant de l'éthanol pendant 1 minute;

E- Stérilisation d'un flacon au centre de la gélose de *Sabouraud* et les boîtes de Pétrie en les rapprochant du feu de bec Bunsen;

F- Mettre le milieu de culture dans les boîtes de Pétri, qui vont être incubées pour 10 à 12 jours dans une enceinte climatique.

G- Après la consistance du centre, on a réparti les graines stérilisées en surface;

H- Incubation des grains pour la recherche des champignons à une température de 28°C.

Remarque :

- Nous avons répété le même protocole pour la réalisation de l'étude sur les organes végétatifs: les feuilles et les racines et les fleurs.

- Nous avons utilisé le milieu de culture (GN) **gélose nutritive** pour la mise en culture des fleurs.

- Nous avons surveillé les boîtes de Pétri chaque 2 jours pour constater les résultats.

Partie III

RÉSULTATS

ET

DISCUSSION

Cette partie regroupe tous les résultats obtenus au cours de cette étude, qui concernent les travaux réalisés sur les cultures fourragères dans la région d'étude et principalement ceux effectués sur nos espèces du Sulla durant les années de la recherche, soit sur le terrain ou au laboratoire.

Ainsi les discussions nécessaires pour bien expliquer ces résultats, en présentant bien évidemment leurs analyses statistiques effectuées.

La présentation des résultats est élaborée en deux chapitres:

➔ Chapitre 1 : Résultats des enquêtes

Nous commençons par les résultats de l'**inventaire** réalisé sur les pratiques culturales fourragères existantes dans le système de production agricole de la région (oasien et mise en valeur). Puis l'**enquête** menée sur les maladies affectants les cultures fourragères et qui font chuter la production fourragère en quantité et en qualité et affectent, par la suite, la production animale.

➔ Chapitre 2 : Résultats de la caractérisation agronomique des espèces de *Hedysarum* cultivées

Nous allons présenter les résultats des essais suivants:

Comparaison de la **germination** et de la croissance des différents écotypes collectés du sulla. Evaluation de la **production herbagère** entre 3 espèces de *Hedysarum* cultivées dans la région d'étude. Essai **d'inoculation** de ces espèces par un rhizobium par la méthode indirecte. Identification des **besoins en azote** comme élément minéral nécessaire pour la croissance et le développement des cultures surtout dans les sols pauvres ou marginaux. Evaluation de la **composition chimique** des espèces du sulla cultivées pour la première fois à Ghardaïa pour estimer sa valeur zootechnique. En fin, un **inventaire** pour connaître l'entomofaune associée à la culture du sulla qui peut manifester des dégâts considérables, ainsi les maladies qui peuvent s'installer sur la culture surtout les maladies cryptogamiques.

Chapitre 1. Résultats d'enquêtes

I. Situation des fourrages cultivés dans la région de Ghardaïa

Les cultures fourragères présentent un grand intérêt pour les systèmes de productions agricoles sahariens et oasiens. Elles méritent une attention particulière de la part des agronomes, des chercheurs et des éleveurs (Janati, 1990). A l'intérieur de ces systèmes, normalement bien équilibrés, existant depuis des siècles, l'élevage a toujours existé et qui répond efficacement aux besoins familiaux. L'élevage est une activité vivante permet d'accroître le revenu de l'exploitation et de créer la richesse en valorisant les produits et les sous-produits de la ferme (pailles, palmes, résidus de récoltes...) et offrant des produits alimentaires de qualité pour la population oasienne (lait, viande, œufs,...). De l'autre cote, les cultures vont se bénéficier des excréments des animaux d'élevage.

Nous voulons par cette enquête exploratoire de mettre en relief l'orientation générale de la pratique des cultures fourragères chez les agriculteurs de la région d'étude en ce qui concerne l'intérêt accordé à ce type de culture, les espèces choisies, les superficies réservées... Dans ce sens, nous avons choisi quelques points à traiter que nous voyons intéressants :

I.1. Spéculations (cultures) pratiquées et superficies réservées aux fourrages dans les exploitations

Les cultures fourragères renferment toutes les cultures destinées à l'alimentation de bétails. Elles appartiennent en général à deux familles: les céréales et les légumineuses. En Algérie, ces cultures se situent dans le dernier centre d'intérêt malgré l'importance accordé à ces cultures pour l'accroissement et le progrès de secteur animal et des productions animales. Notons que tellement les cultures fourragères (surface et production) sont négligeables, elles sont additionnées dans la plupart des cas avec "autres cultures" dans les statistiques agricoles. La situation actuelle de la fourragiculture dans le pays est vraiment critique. Sur les 8,56 millions d'hectares de la SAU, les fourrages (naturels et artificiels) représentent un pourcentage très faible de 11,21%.

D'après les statistiques agricoles officielles, les superficies réservées aux cultures fourragères, céréales et légumineuses confondues, dans la région de Ghardaïa sont évoluées de 2420 ha en 2013 à 5200 ha en 2020, soit un accroissement de 114.87%, sachant que l'année 2016 a enregistré une superficie jugée élevée de 6414 ha (MADR, 2020). Ces terres produisent une production cumulée de 44.640 t en 2013 et 122.710 t en 2020 de fourrages verts, soit un accroissement de 174.88%, tenant en compte que la production a reculé en 2017 à 80.693 t (les superficies et les productions ne sont pas toujours corrélées). La production de la wilaya représente un taux très faible par rapport à la

production nationale (1,19% en 2013 ; 2,42% en 2020) (**Figure 22**). Signalons que la wilaya ne dispose pas des fourrages dites en sec (pluvial), vu les caractéristiques météorologiques de la région. Donc, la présence de l'eau pour irrigation est très indispensable durant toute l'année, soit en sous-pivots ou par aspersion.

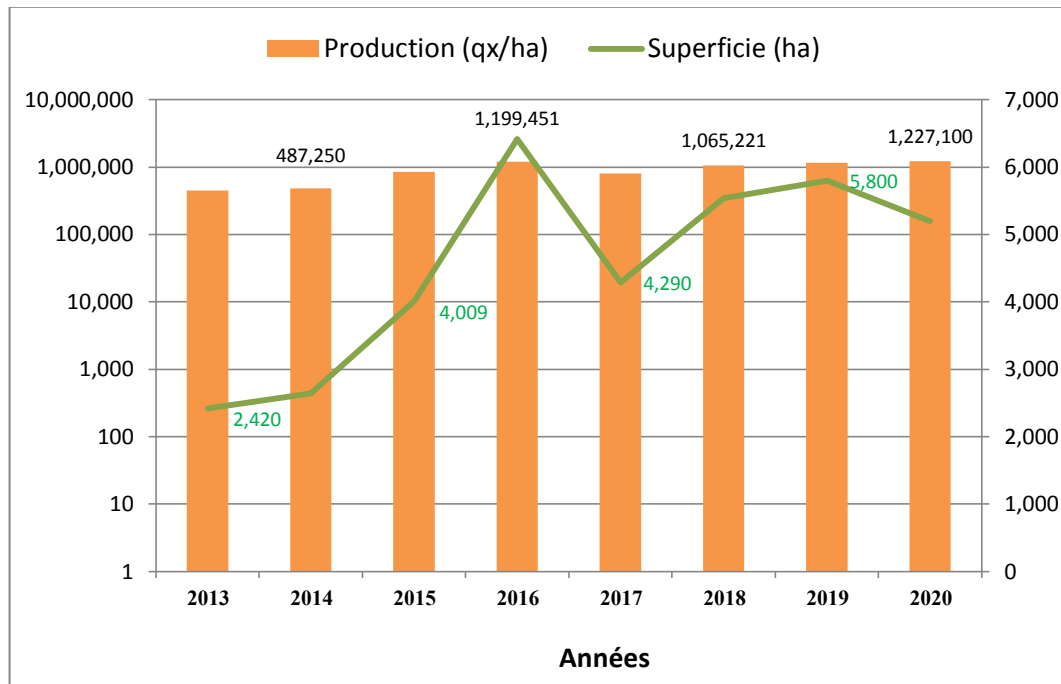


Figure 22 : Evolution des superficies réservées aux cultures fourragères et les productions (2013-2020)

En termes de rendements, les céréales fourragères ont enregistré un rendement moyen de 212 q/ha entre 2013 et 2020, alors que les légumineuses fourragères ont enregistré un rendement moyen de 160,2 q/ha dans cette même période.

Nos deux prospections effectuées dans le territoire de la wilaya, nous ont conduits à plusieurs constatations et remarques sur les espèces cultivées et les emblavures occupées. Les résultats de ces données sont récapitulés dans le graphique de la **Figure 23**.

Les superficies réservées aux cultures fourragères sont très faibles, elles sont extensives et loin de répondre aux besoins de cheptel. 30,88% des agriculteurs disposent des superficies très intéressantes pour cette culture (> à 150 ha), alors que 41,18% pratique la culture fourragère dans des superficies inférieures à 5 ha (pour leur cheptel seulement si elles suffisent). De point de vue des spéculations les plus pratiquées dans la région, on trouve que la céréaliculture occupe la 1^{ère} place qui est pratiquée par 36,76% des agriculteurs; suivi par la phœniciculture (27,94%); et en dernière place les cultures fourragères (8,82%) (**Figure 23**).

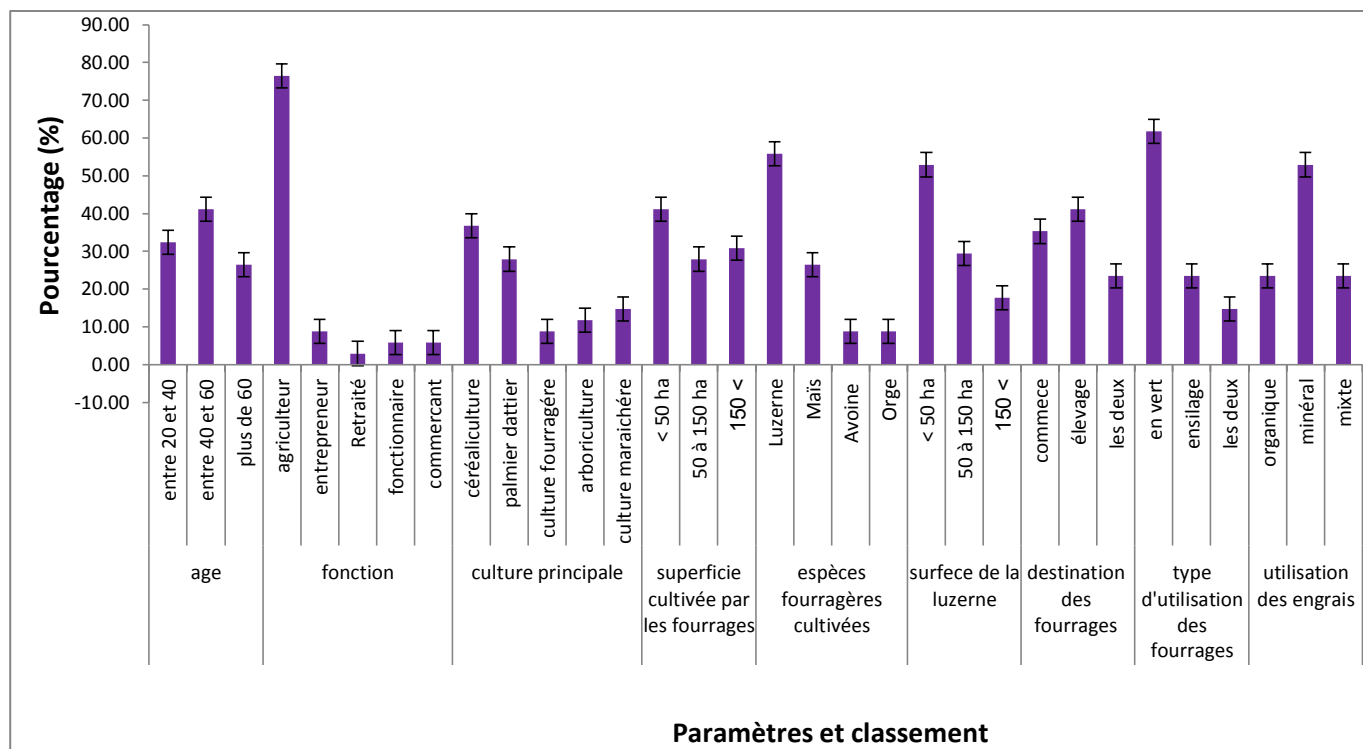


Figure 23 : Résultats bruts de l'enquête sur les cultures fourragères dans la région de Ghardaïa (2021 et 2022)

I.2. Espèces fourragères cultivées

L'ensemble des exploitations enquêtées pratiquent les cultures fourragères. C'est un point jugé intéressant si on compare la situation avec des études précédentes: en 2007, seulement 59% des exploitations des trois wilayas du sud algérien (Ghardaïa, Ouargla et El-Oued) pratiquent au moins une culture fourragère (Chaabena et Abdelguerfi, 2007). Le nombre des espèces trouvées chez ces agriculteurs enquêtés est très faible, pas de diversification, trois d'entre elles sont des graminées. Ces espèces sont: la luzerne, le maïs, l'orge et l'avoine.

En consultant les statistiques agricoles du ministre de l'agriculture algérienne, nous trouvons des espèces citées dans la série et qui concernent la wilaya de Ghardaïa, mais ne sont pas mentionnées par les agriculteurs:

Mais-Sorgho, Orge, Avoine, Seigle en vert, Trèfle et luzerne (MADR, 2020).

La luzerne est l'espèce la plus pratiquée, elle est cultivée par 55,88% des exploitations visitées entre exploitations traditionnelles et modernes, suivi par la culture du maïs avec 26,47% puis l'orge et l'avoine avec des pourcentages similaires (8,82%). Nous avons noté que toutes les exploitations pratiquent plus d'une seule espèce (2 ou 3), pour combler entre elles surtout en cas de faible production (entrée en dormance, manque de fertilisants, ...). Seulement 17,56% des exploitations

cultivent la luzerne comme principale culture en grandes surfaces (> à 150 ha), et la majorité ont des petites superficies de < 50 ha (même 3 ou 5 ha); peut-être pour des élevages familiaux.

La remarque la plus importante ici, c'est que aucun agriculteur ne cultive des espèces qui se chevauchent ou s'alternent dans le temps entre l'hiver et l'été, ils vont tous vers l'utilisation de l'ensilage dans les périodes critiques (ici s'inscrit l'objectif de notre étude).

D'après notre discussion et interview avec les agriculteurs expérimentés de la région, il existe d'autres espèces à vocations fourragères qui sont négligées et marginalisées malgré leur adaptation aux conditions édapho-climatiques du milieu et leur valeur alimentaire intéressante, citons par exemple: le sorgho (Tafsout), le choux fourrager (Achranba)...

Il est sans doute important de signaler que d'autres espèces sont connues partout dans le nord de l'Algérie et même en grande culture, mais elles ne sont pas pratiquées jusqu'à l'heure actuelle, nous mentionnons à titre d'exemple: le colza (*Brassica napus* L.) et le sulla (*Hedysarum* sp.), ... L'agriculteur donc doit chercher un calendrier fourrager permettant de produire du vert durant toute l'année (Janati, 1990).

Donc, c'est très intéressant, tout d'abord, de vulgariser auprès des agriculteurs-éleveurs et les convaincre pour ne pas considérer les cultures fourragères comme secondaires ou des cultures sans importance, et par la suite diversifier le nombre des espèces fourragères à cultiver et appliquer un calendrier fourrager pour bien alimenter les animaux d'élevage.

I.3. Utilisation des engrais

Les sols sahariens ont la particularité de pauvreté en éléments nutritifs, d'où l'agriculture saharienne présente une particularité spécifique. Le maintien d'un sol fertile dans les régions désertiques et marginales nécessite l'utilisation des amendements élevés de la fumure organique (30 à 40 tonnes / ha/an) (Ben Tamallah, 1987 ; Janati, 1990).

Toutes les exploitations visitées utilisent les intrants pour remplacer le manque des éléments du sol. 53% utilisent seulement les intrants chimiques, et ceux qui ont choisi l'amendement organique ou le mixage entre les deux types représentent le même pourcentage de 23,53%. Nous devrions estimer les quantités énormes des engrais minéraux épandus dans les sols sahariens et leur effet sur les ressources naturelles (eau et sol) et la santé humaine, végétale et animale. D'après Rahal-Bouziane *et al.* (2003), les espèces fourragères cultivées dans les oasis d'Adrar sont très peu ou pas du tout fertilisées par l'apport d'engrais chimiques, les parcelles sont par contre amendées par le fumier.

I.4. Type de produit final (vert, ensilage, ...)

Les fourrages fauchés sont soit utilisés directement pour l'alimentation des animaux, dite consommée en vert, soit conservés pour l'utiliser dans les périodes creuses de l'année où les espèces fourragères sont en dormance ou improductives. En réalité, un fourrage consommé directement vert est déconseillé car il provoque des problèmes gastriques notables. La pratique des préfanages du sulla 48 et 72h respectivement, soit conditionnés ou non conditionnés, fournissent des ensilages d'excellente qualité. Ainsi, la conservation des fourrages par voie humide, en conditions anaérobies, fournit un ensilage de haute qualité dont toutes les caractéristiques physiques, chimiques et biochimiques sont préservées (Slim et Ben Jeddi, 2012).

Dans notre enquête, 61,76% des agriculteurs donnent à leurs animaux des fourrages en vert et seulement 23,53% procèdent à la pratique de l'ensilage. La combinaison entre ces deux modes est effectuée par 14,70% des exploitants. On a trouvé entre les agriculteurs enquêtés ceux qui ne disposent pas d'animaux d'élevage, donc ils pratiquent cette culture de point de vue commercial et la totalité de leur production est destinée exclusivement à l'extérieur (la vente au marché national). Nous avons constaté visiblement des quantités énormes des ensilages sous forme d'enrubannés transportées vers les wilayas du nord (Bejaïa, ...). Cet échantillon représente un taux de 35,29%. Les exploitants qui sont purement agriculteurs-éleveurs représentent un effectif de 41,18%, cela veut dire que la totalité de la quantité produite de fourrages est consommée par leur cheptel.

D'après notre opinion, la meilleure méthode de production agricole est le jumelage entre la production végétale (fourrages) et la production animale (élevage), où l'agriculteur connaît bien la source et la qualité de l'aliment donné à son cheptel. De l'autre côté, il va bénéficier du fumier organique propre et local issu du nettoyage des bâtiments d'élevage. Le reste (23,53%), sont des agriculteurs-éleveurs-vendeurs; ils ont des superficies cultivées par les fourrages supérieures à leur besoins, ils procèdent à la vente du surplus de sa production.

Le retournement des andains pour les petits agriculteurs nécessite du temps et des coûts élevés, la chose qui a poussé les chercheurs à trouver une solution permettant de réaliser un ensilage de sulla de qualité qui s'appuie principalement sur l'éclatement des tiges après un préfanage (Slim et Ben Jeddi, 2012) qui peut améliorer la quantité de la matière sèche. Ces méthodes ne sont pas pratiquées dans notre pays.

II. Maladies des cultures fourragères de la région et les produits phytosanitaires utilisés

Dans cet inventaire nous allons recenser les maladies et les ravageurs qui attaquent les cultures fourragères dans la région de Ghardaïa, à travers une enquête réalisée auprès des agriculteurs pratiquants cette culture. Nous avons jumelé cette enquête avec celle de la partie précédente. Dans le même contexte, nous avons inventorié les produits phytosanitaires (pesticides: insecticides, ...) utilisés par les agriculteurs pour lutter contre les ennemis des cultures afin de protéger les cultures fourragères qui sont la base de l'alimentation et la production animale.

Nous avons choisi d'enquêter ce sujet pour des raisons culturelles, parce que notre culture est une culture fourragère et appartient à la famille des légumineuses. Donc, notre culture installée dans la région est susceptible d'être ravagée par ces insectes et maladies. L'approche que nous avons adoptée est la collecte des données d'après les agriculteurs et/ou des ingénieurs exécutifs sur le terrain et par la suite nous avons essayé de les compléter par des informations additionnelles et des explications nécessaires pour bien éclairer le ravageur ou la maladie (noms scientifiques, symptômes, dégâts occasionnés...).

Tout cela, pour arriver à illustrer l'attitude des agriculteurs envers les fourrages, autrement dit est ce que l'agriculteur accorde une intention particulière à ce type de culture comme les cultures céréalières et pérennes qui assurent des revenus intéressants (point de vue économique)? Dans ce sens, nous avons choisi quelques points à traiter que nous voyons intéressants pour éclairer quelques angles sombres dans ce domaine:

II.1. Principales maladies et ravageurs rencontrés dans les cultures fourragères et les dégâts occasionnés sur les plantes

Les maladies et les ravageurs des cultures sont présents à tout moment et en tout lieu. Les conditions climatiques jouent un rôle très important sur la vie et le développement de ces agents biotiques.

Notons que toutes les maladies et ravageurs déclarés par les agriculteurs sont de type aérien; autrement dit, nous n'avons pas trouvé une attaque signalée au niveau racinaire telle que les nématodes et les champignons du sol. Cela revient, peut-être, à la connaissance requise par l'agriculteur et son équipe de travail sur le champ.

*** sur la luzerne**

100% des agriculteurs ont annoncé la présence de deux espèces d'insectes:

- le puceron de la luzerne, sans préciser laquelle espèce. En cas d'attaque, la luzerne peut former un réservoir hivernal pour les viroses pour les autres légumineuses, et le miellat produit par ces pucerons abouti au développement de la fumagine et attire des insectes tel que la noctuelle. Dans la littérature, nous avons trouvé deux espèces de pucerons qui peuvent attaquer la luzerne : *Aphis craccivora* (qui transmet un grand nombre de virus, y compris le VML) et *Therioaphis trifolii*. Les agriculteurs ont observé des dommages intenses et des dessèchements des feuilles de luzerne. Ces insectes sussent la sève des plantes et les symptômes observés sont l'arrêt de pousser, un flétrissement général et le rabougrissement des feuilles.

- noctuelle défoliatrice, lépidoptère, papillon polyphage, perturbe le développement végétatif de la luzerne en cours de végétation, et détruit les jeunes semis au moment de la levée. Elle provoque des dégâts soudains et importants par une activité alimentaire principalement nocturne (elle reste caché dans la journée). Le ver de noctuelle dévore toutes les feuilles et les fait tomber.

- Quelques agriculteurs ont ajouté la présence de la mineuse des feuilles de la luzerne (*Agromyza frontella*), un ravageur diptère des cultures de luzerne. Ses larves se développent entre l'épiderme inférieur et l'épiderme supérieur du limbe des feuilles dans des galeries creusées. À la fin du 3^{ème} stade larvaire, la larve coupe l'épiderme de la foliole supérieure et tombe sur le sol où elle passe à la phase de nymphose, elle mange tous les tissus végétaux foliaires, ne laissant que les couches épidermiques transparentes, on peut l'observer à l'aide d'un microscope binoculaire sans ouvrir les folioles (Quirin et Mcnei, 1984). La diapause de l'insecte est directement reliée aux basses températures de l'air et à la photopériodisme (James *et al.*, 1983).

Les dégâts de cette mineuse consistent principalement en une dégradation de la qualité fourragère. Une coupe au stade début floraison permet de se débarrasser de 40 à 50% des mineuses présentes dans le champ. *Dacnusa dryas* et *Chrysocharis punctifacles* deux ennemis naturels les plus efficaces contre la mineuse.

*** sur le maïs**

- plus de 55% des agriculteurs ont annoncé une ennemie principale du maïs qui est la pyrale du maïs (lépidoptère : *Ostrinia nubilalis*). Les symptômes que nous avons observés sont des déformations et des perforations au niveau des parties aériennes des plantes et ainsi sur les épis et/ou les panicules. Les dommages sont souvent observés sur les feuilles (fine couche d'épiderme transparent), de criblures, panicules cassées à sa base (RAP, 2018).

Le seuil de nuisibilité par la pyrale est annoncé lorsque 10% des pieds de maïs portent au moins une ponte de pyrale (Ardenne, 2017).

- Un seul agriculteur (à travers son ingénieur) a déclaré la présence des symptômes de la fusariose sur le maïs : un brunissement des grains touchés puis développement d'un mycélium rafle. La fusariose de l'épi est une maladie cryptogamique du maïs la plus économiquement importante, elle est très répandue. Elle est causée par différentes espèces de *Fusarium*, dont l'espèce principale et la plus agressive est *Fusarium graminearum*.

*** sur l'orge**

- 8,82% des agriculteurs ont annoncés via leurs ingénieurs la présence des attaques sur l'orge. Alors que les autres ont déclaré que leurs cultures sont indemnes de maladies.

Les symptômes manifestés sur les plantes sont des taches jaunes au niveau des tiges et des feuilles, donc c'est un agent cryptogamique attaquant l'orge qui est la rouille de l'orge, *Puccinia graminis*, qui est un champignon redoutable de point de vue économique dans le monde entier. Il occasionne la perte quasi-totale de la production de l'orge (feuilles et graines). La rouille noire est une importante maladie fongique de l'orge, du blé et de l'avoine dans tout le monde (Fetch *et al.*, 2020). Ces auteurs annoncent que la meilleure solution de lutte contre cette maladie est l'incorporation des gènes de résistance dans le génome des variétés commerciales et qui ont été efficaces contre la plupart des races de *Puccinia graminis*, l'agent causal.

*** sur le sorgho**

- d'après notre enquête, nous avons recensé plus de 90% des agriculteurs qui ont déclaré l'infestation de leurs champs de sorgho par le puceron jaune. Selon la bibliographie, il s'agit de *Melanaphis sacchari*. L'infestation est observée uniquement au niveau de la face inférieure des feuilles de la plante. Contrairement à tous les autres stades phénologiques du sorgho, le stade épiaison est le plus infesté. Les feuilles ont un symptôme de jaunissement et brunissement, et le miellat recouvrant les feuilles et les tiges attire les fourmis. Trois ennemis naturels pour ce puceron jaune de sorgho sont annoncés: Coccinelles (*Hippodamia convergens*), Syrphes (*Episyrphus balteatus*) et Chrysopes (*Chrysopa spp.*) (Exilien, 2020).

- le 2^{ème} agent nuisible de types fongique attaquant le sorgho chez quelques agriculteurs est la rouille, *Puccinia purpurea*, qui a des effets négatifs sur la surface d'interception lumineuse et la photosynthèse. Il attaque toutes les variétés du sorgho principalement entre 6 à 7 semaines après le

semis, et les symptômes typiques observés sont des taches colorées violet, rouge ou marron des deux cotées de la feuille (Fritzner, 2022).

Les pertes causées par la rouille de sorgho peuvent y aller jusqu'à 13% dans la plantation tardive (White *et al.*, 2014).

II.2. Produits phytosanitaires utilisés et modes d'emploi

Face à ces attaques redoutables des insectes, des pucerons, des champignons... la prévention et la lutte curative deviennent indispensables. La totalité des investisseurs interrogés (100%) procèdent aux traitements phytosanitaires et à l'utilisation des produits phytopharmaceutiques. Nous avons noté l'absence totale de la lutte biologique et ni-au-moins la lutte intégrée, peut-être vu le cout de ces techniques et l'efficacité attendue qui est généralement très lente par rapport à la dissémination exponentielle des agents pathogènes.

* sur la luzerne

Les insectes nuisibles à la culture de la luzerne sont attaqués par des insecticides spécifiques. Le choix du tel ou tel produit est effectué soit par les ingénieurs exécutifs sur le champ, soit par les grenetiers fournisseurs de ces produits commerciaux.

- 50% des agriculteurs enquêtés la première année utilisent un produit spécifique pour les pucerons qui est : ACETAMIPRID (qui traite tous les insectes piqueurs-suceurs), et 25% utilisent un insecticide qui tue la noctuelle : SPINOSAD (efficace contre les chenilles, thrips, mouches, mineuses...) (Mazollier, 2008). Ils ont annoncé que ces produits phytosanitaires sont efficaces à 100% et éliminent la totalité des individus d'insectes, à condition qu'ils doivent être utilisés dans le moment opportun et par une démarche correcte. D'après la bibliographie, ces deux produits sont d'origine organique, et ne constituent pas de grands dégâts sur la faune et la flore spontanée. Durant la 2^{ème} prospection, nous avons constaté que les agriculteurs attaquent les insectes nuisibles des cultures par d'autres insecticides:

- ROCHLOP, pour lutter contre les pucerons, est un insecticide polyvalent à base de chlorpyrifos éthyl. Il contrôle un large spectre d'insectes ravageurs sur plusieurs cultures comme: pucerons, cochenilles, carpocapse, psylle, etc. Il agit par contact, par ingestion et par inhalation (vapeur). Il possède un effet neurotoxique et manifeste une longue persistance d'action (Profert, 2022).

- AMPLIGO pour lutter contre la mineuse de la luzerne. Ce dernier est constitué de deux matières actives: le Chlorantraniliprole et le Lambda-Cyhalothrine, à longue rémanence. Il est utilisé fréquemment sur *Tuta absoluta* de la tomate (0,3 l/ha) (Syngenta, 2022).

*** sur le maïs**

Pour la pyrale du maïs, 30% des agriculteurs utilisent l'insecticide CYPERMETHRIN qui a une efficacité estimée à 25%. Sachons que l'intervention par des pulvérisateurs est pratiquement difficile parce que la hauteur des plants dépasse les 2m, donc ils font passer le produit par le système d'irrigation pour réduire les dégâts. Un autre produit recensé pour l'insecte de pyrale est l'insecticide CYCLONE. Il est utilisé par la totalité des agriculteurs (100%) grâce à son efficacité qui est de l'ordre de 100%.

*** sur le sorgho et l'orge**

- pour se débarrasser du puceron du sorgho, 50% des agriculteurs ont annoncé l'utilisation d'un insecticide systémique CONFIDOR. Il est doté d'un large spectre d'action, surtout sur les insectes piqueurs-suceurs ravageurs et les mineuses. Il est utilisé sur une large gamme de cultures surtout maraichères (30 ml/100 litres d'eau (pucerons) et 50 ml/100 l d'eau (mouche blanche) dès le début d'attaque des ravageurs) (Agrichem, 2022).

- pour la maladie cryptogamique rouille de sorgho, nous avons trouvé que 50% des agriculteurs utilisent le fongicide systémique ORTIVA qui contrôle plusieurs maladies fongiques des cultures (Agrichem, 2022). Il est appliqué sur les légumineuses alimentaires en pulvérisant une dose de 0,8L/ha dans 300-400 l d'eau en lutte préventive. Les agriculteurs déclarent que son efficacité est à 100%.

- le puceron de l'orge est traité par l'insecticide systémique THIAMETHOXAM (la préparation commerciale est Actara 25 WG). Il est reconnu par sa toxicité pour les abeilles, d'où la législation phytosanitaire interdit son utilisation pendant la période de floraison car il persiste même à des petites concentrations au niveau des fleurs (Chahbar *et al.*, 2011).

- le champignon redoutable de l'orge, la rouille, est lutté par le fongicide PROPICONAZOLE CYPROCONAZOLE, qui est connu par son efficacité chez tous les agriculteurs. C'est un produit nouvellement introduit en Algérie. Dans une étude effectuée récemment, les résultats validés ont révélé que ce fongicide réduit fortement la reprise pycnidienne et les réductions de sévérité jusqu'à 80% par rapport aux plantes témoins (Hennouni *et al.*, 2012).

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Nous avons remarqué que les agriculteurs courent toujours vers l'utilisation des pesticides à usage multiple, pour éviter l'acquisition d'un nombre important de produits chimiques. C'est un point jugé positif en considérant la nature et la santé public et les êtres vivants, mais à condition qu'ils soient efficaces. Ainsi, sur le plan économique, un pesticide à usage multiple garantie l'optimisation des coûts et des charges et épargne de l'argent.

Chapitre 2. Caractéristiques agronomiques de sulla cultivé et identification des exigences culturales

Dans le but de préciser les caractéristiques agronomiques, d'identifier les exigences culturales des sullas cultivés dans la région de Ghardaïa, et dans l'objectif de déclarer les perspectives de production fourragère en terme de quantité et de qualité, nous avons installé un ensemble d'essais et des expérimentations sur le terrain. Chaque essai ou expérience couvre et présente une thématique bien déterminée, et donne une constatation du terrain bien précise.

2.1. Comparaison de la germination, de la croissance et de développement de 3 écotypes différents du Sulla (*Hedysarum coronarium*)

La germination des graines est considérée le processus principal de la croissance et du développement des plantes. Elle est soumise à des conditions très variables: climatiques, édaphique, génétique... la dureté et la dormance des semences sont des contraintes biologiques très importantes qui limitent la germination et les étapes qui les suivent. La composition chimique de la solution du sol, surtout la salinité, affectent ainsi considérablement la germination, soit à cause du potentiel osmotique créé entre la graine et la solution salée qui bloque l'absorption de l'eau, ou bien par l'effet toxique des ions de sodium et de chlorure (Poljakoff-Mayber *et al.*, 1994). Notons que ce problème est très répandu dans les sols sahariens.

2.1.1. La germination

Le semis des trois populations (écotypes) de *Hedysarum coronarium* collectées de trois régions de l'Algérie est réalisé le 21 décembre 2017 sur des plaques à alvéoles pour assurer le suivi et faciliter les comptages. Le suivi est composé des axes ci-après:

❖ 2.1.1.1. Date de germination et taux de germination

Cette date est déterminée pour chaque population lorsqu'on observe l'apparition du premier plant au niveau du sol, et cela pour les 4 plaques semées des 3 populations choisies.

- l'apparition des premiers plants pour les 3 populations est enregistrée le même jour (le 24 décembre 2017), c'est-à-dire 3 jours après le semis (JAS). C'est une vitesse très intéressante, elle se ressemble beaucoup à celle enregistrée par nous en 2014 sur la même espèce et dans les mêmes conditions (Moussaouali, 2014), nous avons noté une germination vers le 4^{ème} JAS.

Donc, d'après cette étude, il y a aucune différence entre les écotypes semés dans le début de la germination.

- Le tableau suivant (**Figure 24**) montre la cinétique de la germination des graines qui signifie le nombre de grains germés dans des intervalles du temps précis. Nous avons choisi 5 dates successives pour le comptage des semences germés (environ 1 mois de suivi):

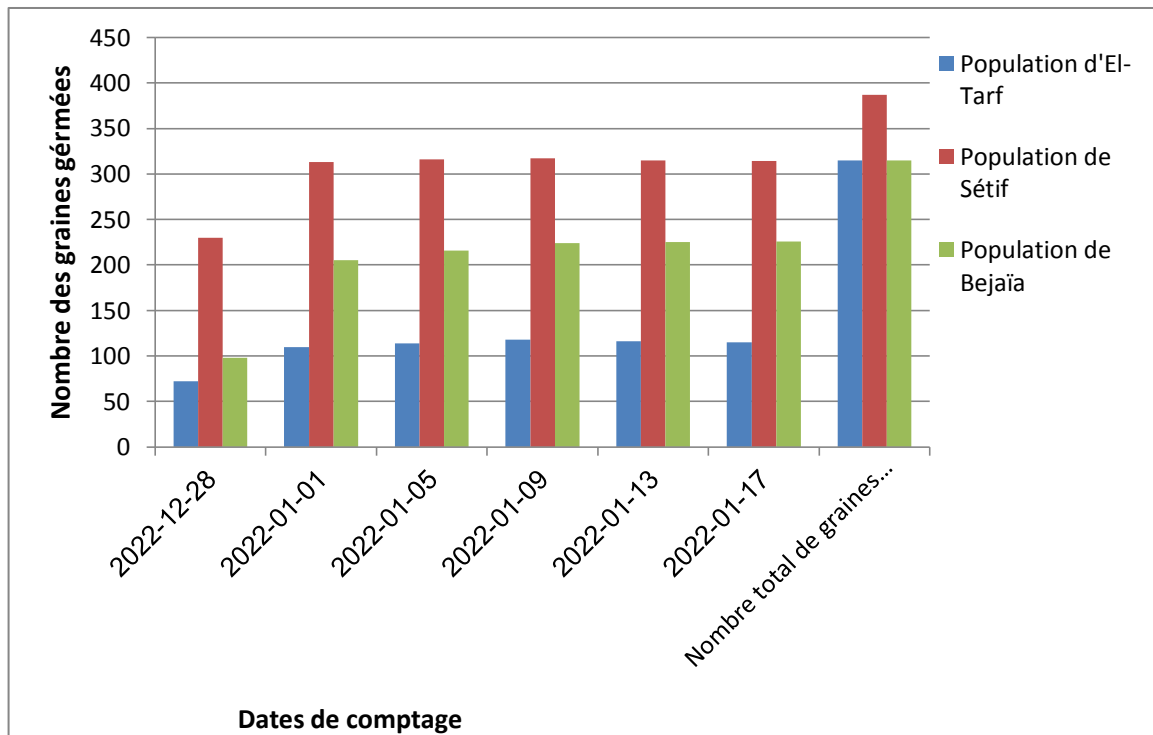


Figure 24 : Evolution de la germination des graines pour les 3 écotypes

D'après le tableau, nous remarquons une différence claire entre ces trois écotypes de *sulla* en ce qui concerne le nombre des grains germés par le temps, et aussi le taux de germination. Le nombre de grains germés ne donne pas une signification satisfaisante (le nombre total des grains semés est différent), à cet effet on procède à la lecture des taux de germination.

Dans le premier jour de comptage, l'écotype de Sétif a enregistré un taux de germination élevé de 59,43%, suivi par l'écotype de Bejaïa avec un taux de 31,11% et en fin 22,86% pour celui d'El-Tarf. Pour le dernier calcul, nous avons noté la même remarque: 81,14% pour la population de Sétif, 71,75% pour la population de Bejaïa, en fin 36,5% pour celle d'EL-Tarf.

Ces chiffres sont très faibles si on les compare avec d'autres espèces soit de la même famille ou d'une autre famille. Le problème de dormance et de la dureté des graines persiste toujours, et donne des faibles taux de germination (Ben Jeddi, 2005). Signalons un autre problème qui est déclaré par le même auteur (Ben Jeddi, 2005) qui est l'âge des semences. Il a recommandé d'utiliser de préférence des semences qui ont dépassés un bon moment après leur formation, et il a mentionné: les graines dures passent de 95% (à la récolte) à 74 % après un intervalle de temps de moins de 3 mois.

Ce problème est expliqué par le fait que l'eau ne peut pas pénétrer à l'intérieur de la graine, elle est empêchée par le tégument et les enveloppes de la graine. Les semences de ce types sont appelée semences dures, ce phénomène est connu et couramment rencontré chez les légumineuses.

Côme et Semadeni (1973) ont signalé qu'il existe souvent chez les légumineuses une relation entre la coloration des téguments et le pourcentage de graines dures. Ils ont travaillé sur *Hedysarum coronarium* L., et ils ont trouvé que le pourcentage de la dureté des graines à couleur blanc-jaunâtre est de 60 à 65%, de 30 à 35% si la couleur brune claire, de 10 à 15% en cas des graines à couleur brune foncée.

Mais pour notre cas, c'est difficile de faire la distinction entre les semences des années différentes dans une campagne d'échantillonnage ou lors d'une prospection, car nous trouvons les semences en mélange au niveau du sol, ou bien on trouve seulement celles qui sont resté sur les tiges après la sénescence des plantes (cela veut dire que ce sont des semences de la même année).

À la fin de cet essai, nous concluons que l'écotype de Sétif est considéré le meilleur pour une utilisation dans les essais suivants, et nous avons décidé de semer seulement les semences de sulla provenant du Sétif, sauf pour un autre objectif.

❖ 2.1.1.2. Pourcentage de la germination

Cette valeur calculée va nous donner une idée sur la santé des graines semées (**Figure 25**). Elle quantifie le nombre des graines qui ont répondu à la germination par rapport aux graines placées dans le sol. Nous avons calculé ce pourcentage de germination (PG %) pour toutes les dates de suivi notées précédemment:

- pour les semences d'El-Tarf, nous remarquons qu'elles ont des pourcentages faibles le long de la période de suivi, malgré que ce sont des valeurs croissantes. Sauf après la 4^{ème} date, nous remarquons un recul de ce pourcentage qui revient à la mort des plantes suite à des causes différentes (présence des symptômes fongiques au niveau des racines et du collet des racines, c'est détaillé dans le chapitre 3.7.2).

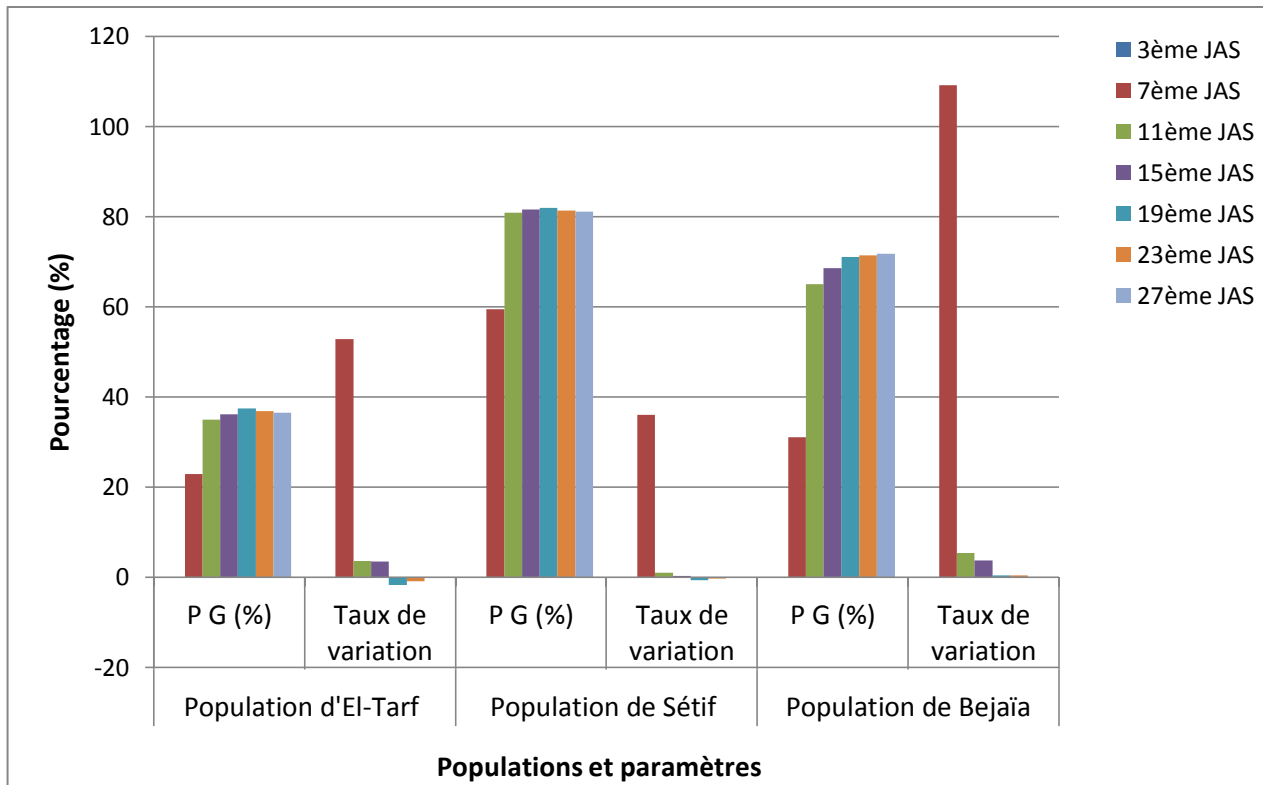


Figure 25 : Evolution des paramètres de la germination chez les populations étudiées

- les semences de Sétif enregistrent le meilleur pourcentage de germination (**Figure 26**), la meilleure valeur enregistrée est de 81,91 lors de la 3^{ème} date de suivi. Nous avons ainsi remarqué une évolution très rapide entre les dates surtout entre la 1^{ère} et la 2^{ème} date. Mais toujours on trouve des reculs qui reviennent essentiellement à la mort des plantes. A cette raison, nous avons choisi l'écotype de Sétif comme référence pour nos essais ultérieurs.

- concernant les semences de Bejaïa, elles ont enregistré un pourcentage intermédiaire entre les deux écotypes précédents, avec une évolution très ralentie. Cette évolution peut être expliquée par le fait que ces semences sont ramenées de l'INRA de Sétif (institut national de la recherche agronomique) où elles étaient stockées. La chose la plus importante pour cet écotpe c'est que nous n'avons pas noté des plants morts dans la période de comptage.

D'après le tableau et la figure, on remarque que le pourcentage de germination a une cinétique très faible vers la fin de la période de suivi, cela veut dire que nos lots de semences ont une quantité non négligeable des grains immatures ou mêmes non vivantes.

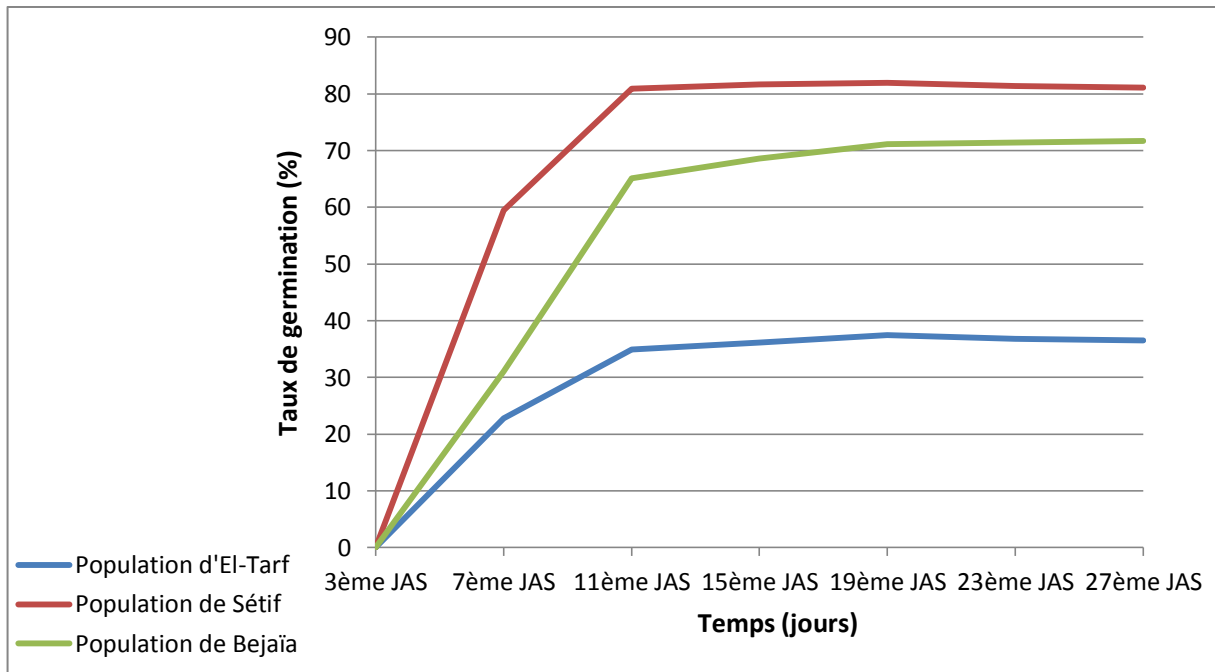


Figure 26 : Evolution du taux de germination chez les 3 écotypes du sulla dans la région de Ghardaïa

Pour le taux de variation, qui mesure le pourcentage de changement entre deux valeurs, comme l'augmentation du nombre des grains germés, chez les semences des trois écotypes est très variable (**Figure 27**). Il commence par une valeur très élevée (109,18% chez les semences de Bejaïa) qui peut être expliqué par le fait que les semences stockées ont une bonne période entre la récolte et le re-semis, d'où la dormance est considérée faible. Ces taux de d'évolution ont ainsi enregistré des valeurs faibles ou même négatives (signifie la mort de quelques plants levés). La phase exponentielle chez les 3 écotypes est très courte, elle atteint la phase stationnaire vers le 11^{ème} jour après le semis, mais avec une différence remarquable dans le maximum achevé de la germination. Le seul écototype qui n'a pas de valeurs négatives est celui de Bejaïa, cela veut dire qu'on n'a pas noté la mort d'aucun plant germé. C'est le cas de la levée de la dormance par le facteur "temps".

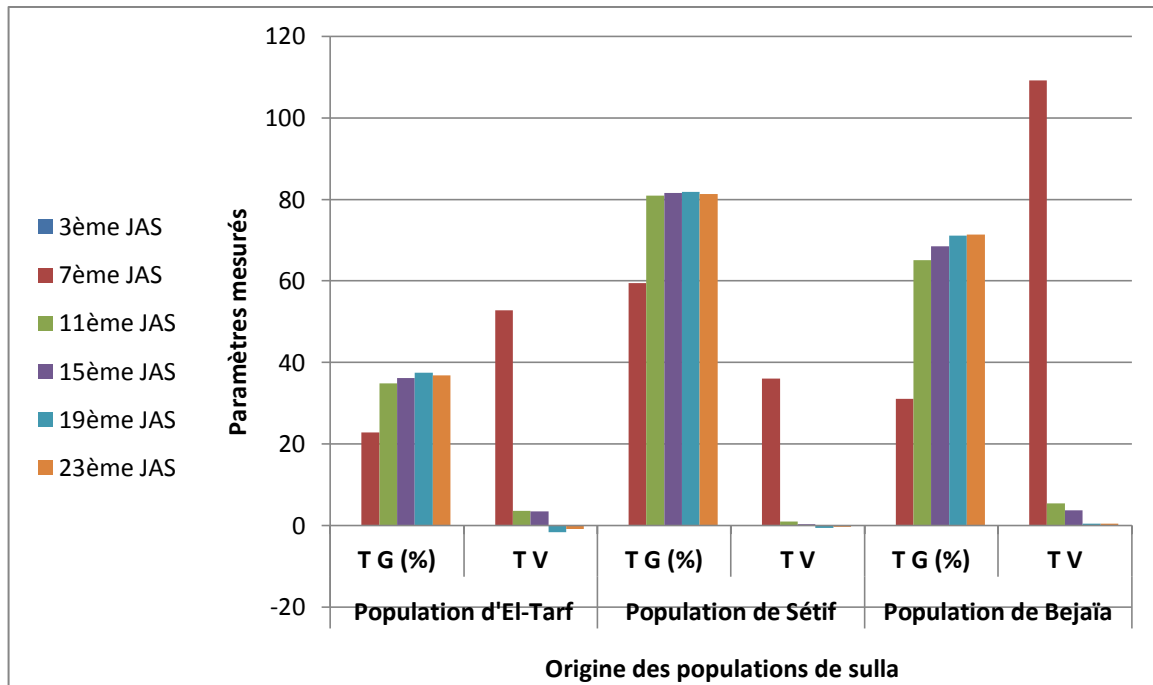


Figure 27 : Evolution de taux de germination et du taux de variation chez les 3 écotypes du sulla

De point de vue général, nous avons essayé de calculer le taux de variation de la germination entre le 1^{er} jour et le dernier jour de comptage pour avoir une idée globale sur les trois écotypes; nous avons noté un taux élevé chez l'écotype de Bejaïa de 130,61% suivi par celui de Sétif avec un taux de variation de 59,72% et en fin le taux le plus faible était de la part de l'écotype d'El-Tarf (36,52%).

D'après ces résultats, on trouve que les écotypes de Sétif et de Bejaïa ont présenté une aptitude remarquable à germer, à croître et se développer dans les conditions d'étude. C'est une adaptation signalée importante pour ces deux écotypes pour les utiliser dans la production fourragère.

❖ 2.1.1.3. Indice de taux de germination

Cet indice nous donne une idée sur le pourcentage de la germination des grains sur chaque jour durant la période d'essai. D'après la figure 3, nous remarquons que les semences du sulla ramené de Sétif ont un indice très élevé de 11,63 par rapport aux autres semences d'origines différentes (8,37 pour les semences de Bejaïa et 5,48 pour celles d'El-Tarf).

Un autre paramètre qui donne la différence entre les écotypes en ce qui concerne la réponse des graines à la germination en expliquant le temps moyen pour germer un lot de semences, c'est le TMG (**Figure 28**). D'après ce paramètre, on peut conclure la fiabilité et la viabilité des semences ainsi estimer l'existence ou l'absence de la dormance semencière. Illustrés sur la Figure 28, les résultats montrent qu'il y a une vraie ressemblance entre les écotypes en ce qui concerne le temps

moyen de la germination (2,67 ; 2,61 ; 2,76 pour les écotypes de El-Tarf, Sétif et Bejaïa respectivement).

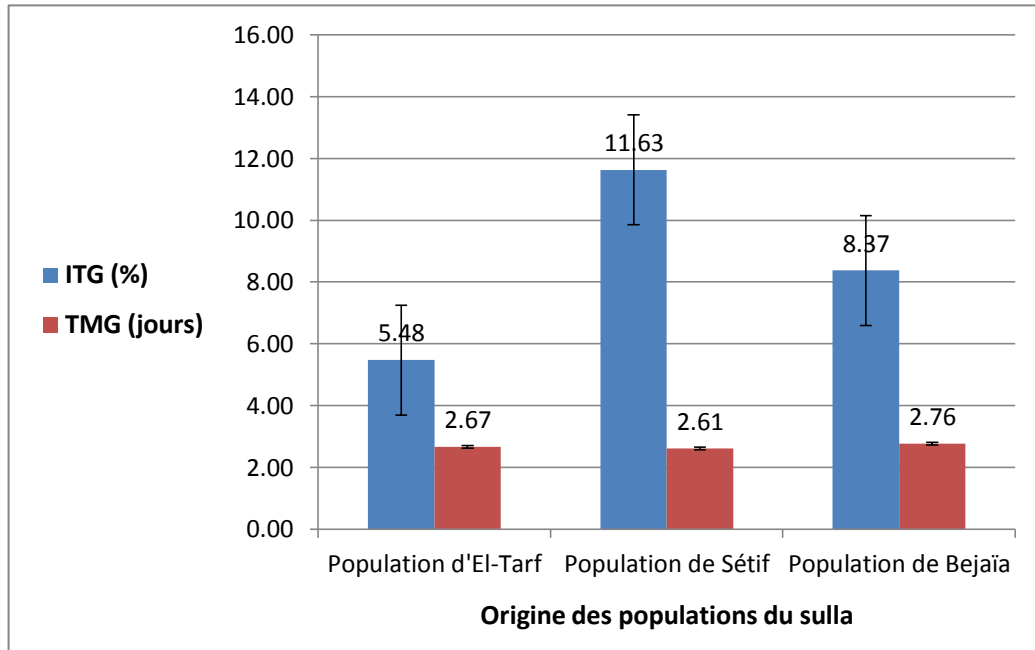


Figure 28 : Variation de l'indice du taux de germination et taux moyen de germination des semences des 3 écotypes du sulla

En comparant ces résultats avec d'autres études, on trouve que cet indice peut y aller plus que celui-là (47,3 chez une plante fourragère *Acacia nilotica*). De l'autre côté, la même étude note des valeurs très faibles inférieures à 5 (Kheloufi et Mansouri, 2017). Cela revient en général aux problèmes de la vitalité, la maturité ou de la dormance physique des graines. Selon Ben Jeddi (2005), chez le sulla spontanée, le taux de graines dures très diversifié a pu atteindre 85%. Cette dormance peut être levée par différents mécanismes: traitement par l'acide sulfurique, trempage dans l'eau, scarification...

2.1.2. La croissance et le développement

La croissance et le développement est l'ensemble des étapes et des phases qui se manifestent sur les plantes, et qui viennent après la germination réelle, elle commence par la levée et se termine par la production des graines (cycle végétatif: de la graine à la graine). Chez les légumineuses, ce cycle renferme deux phases principales : phase végétative et la phase reproductive; ces 2 phases sont elles-mêmes constituées de 9 étapes. Dans cette partie, nous allons étudier quelques étapes à titre indicatif (**Tableau 13**).

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Tableau 13 : Caractéristiques culturelles des 3 écotypes du sulla comparés avec deux études antérieures

	Slim <i>et al.</i>, 2012	Moussaouali 2014	Notre étude de 217/2018		
	Population tunisienne	Population algérienne	Population de Sétif	Population de Bejaïa	Population d'El-Tarf
Critère	Nombre de JAS	Nombre de JAS	Nombre de JAS		
Date de semis	/	24/12/2012	21/12/2017		
Germination	/	4 JAS	3 JAS	3 JAS	3 JAS
Levée	7-10 JAS	6 JAS	5 JAS	5 JAS	5 JAS
Apparition de la 1 ^{ère} feuille simple (50%)	/	15 JAS	17 JAS	24 JAS	22 JAS
Apparition de la 2 ^{ème} feuille simple (50%)	/	31 JAS	40 JAS	43 JAS	42 JAS
Apparition de la 1 ^{ère} feuille composée	40 – 45 JAS	50 JAS	55 JAS	57 JAS	54 JAS
Apparition de la 1 ^{ère} ramification	77 JAS	72 – 76 JAS	80 à 82 JAS	85 à 88 JAS	83 à 86 JAS
Bouton floral (50%)	138 JAS	102 JAS	105 JAS	107 JAS	110 JAS
Floraison	155 JAS	107 – 117 JAS	112 à 120 JAS	115 à 125 JAS	120 à 132 JAS
Durée de la phase florale	32j	30j	35j	36j	40j
Durée de la maturité des graines	30 - 40j	25 - 30j	30 à 35j	33 à 38j	35 à 40j
Fleurs/inflorescence	70 +/- 12	38,24 +/- 15	33,8 +/- 10	26,2 +/- 10	35,2 +/- 10
Inflorescences/plante	58 +/- 21	251,27 +/- 17	98,5 +/- 16	10,2 +/- 3	12,7 +/- 4

Les caractéristiques culturelles entre les études et les écotypes présentées dans le tableau sont variables, malgré qu'il s'agisse de la même espèce (*Hedysarum coronarium*). Nous pouvons résumer les causes de cette différence dans les mots suivants:

- la provenance des semences: chaque lot est ramené d'une région donnée, donc les caractéristiques géo-climatiques diffèrent d'une région à une autre;
- l'année de la culture: les trois cultures sont cultivées dans des années différentes. Chaque année a ses caractéristiques spécifiques surtout climatiques telles que les températures et le cumul des précipitations et l'humidité de l'air;

- le comportement d'une espèce donnée dans son aire naturelle est différent de celui de la même espèce dans des habitats nouveaux (adaptation).

Conclusion

L'étude de la germination et de la croissance des espèces dans une nouvelle région est un travail très délicat et sensible. Plusieurs facteurs et paramètres peuvent influencer la germination et la levée, soit positivement ou négativement, qui doivent être suivis séparément et en entier.

Les trois écotypes choisis du sulla ont des caractéristiques différentes, suite à leur provenance, à savoir la vitesse de la germination, le taux de germination, la faculté germinative... et surtout la présence ou l'absence du problème majeur des légumineuses, la dormance. Ce phénomène est considéré par quelques auteurs comme un avantage vu que la densité de peuplement du sulla va augmenter la 2^{ème} année de culture par ces graines dures.

D'après cette étude, tous les écotypes semés ont répondu à la culture, à des pourcentages différents, mais toujours on trouve des espèces qui évoluent mieux que les autres. Signalons que l'écotype de sulla de Sétif a manifesté une adaptation remarquables et une croissance rapide, cela pourrait être du aux conditions naturelles de son habitat d'origine: altitude et températures très basses en hiver (période de la majorité du cycle végétatif de la plante).

Le choix de la date de semis est un critère crucial pour la réussite de la culture pour tous les écotypes. Un retard dans le semis abouti à un cycle végétatif très court qui se manifeste par une matière végétale faible et une production semencière insatisfaisante. Les conditions de la germination et des autres stades phénologiques doivent être toutes réunies surtout dans les conditions extrêmes ; à savoir l'humidité du sol et la température nécessaire (date de semis).

2.2. Comparaison de la production herbagère et fourragère de trois espèces de *Hedysarum*

Dans l'expérience précédente, nous avons conclu que *Hedysarum coronarium* (surtout l'écotype de Sétif) a présenté une aptitude importante au développement et à la croissance dans la région. Ainsi, après les premiers signes de réussite de l'expérience installée en 2012/2013 dans les mêmes conditions de la région avec l'espèce *Hedysarum coronarium* vient ce sujet. Le présent travail a pour objectif de réaliser une comparaison entre trois espèces différentes du genre *Hedysarum* sur l'adaptation dans ce nouvel habitat saharien et sur la production fourragère dans les systèmes de production agricole de la région de Ghardaïa (étage bioclimatique hyperaride), dont la finalité est de l'intégrer dans le calendrier fourrager de la région pour qu'il soit destiné à l'alimentation de bétails et la production du lait chez les bovins, les ovins ou les caprins. Ces trois espèces du sulla sont : *Hedysarum coronarium*, *Hedysarum carnosum*, *Hedysarum flexuosum*.

2.2.1. Critères et principes du choix des espèces

L'Algérie se dispose d'un nombre important d'espèces de sulla le long du territoire national. D'après des études précédentes, le nombre de ces espèces s'élève à 10 espèces endémiques (Quezel et Santa, 1962). Signalons que ces espèces ne s'étendent pas vers les steppes ni vers le sud, elles sont limitées par les zones d'intérieur et les plateaux telliens. La seule espèce recensée qui dépasse l'atlas saharien est *Hedysarum carnosum*, qui a occupé les sols de Biskra. Elle est considérée comme une espèce des régions difficiles (Abdelguerfi *et al.*, 1991).

Les espèces de *Hedysarum* sont des espèces légumineuses fourragères à forte production en matière sèche et en protéine. Elles sont conseillées pour les élevages des animaux domestiques du fait qu'elles entrent en production de vert lorsque les autres fourrages (t.q. *Medicago sativa*) sont en pleine dormance. Elles servent, par excellence, comme tête de rotation dans les systèmes de production, en laissant le sol riche en azote et les céréales en bénéficient énormément.

Après une lourde recherche bibliographique et une large communication avec des auteurs, des professeurs et des experts algériens et tunisiens nous avons décidé de choisir 3 espèces représentatives pour réaliser cette étude d'adaptation et de perfectionnement (professeurs: Abdelguerfi, Slimani, Kadi, Ben Jeddi, Fitouri). Le choix est strictement basé sur l'élasticité de l'espèce, son aptitude à s'adapter, résistance à la sécheresse, résistance même moyenne à la salinité, résistance au froid, capacité de production fourragère intéressante... dans ce contexte, Julien (1894) cité par Abdelguerfi-Berrekia *et al.* (1991) a déclaré la possibilité de cultiver les espèces du sulla dans d'autres régions de l'Algérie hors leurs habitats natives, il a encouragé la culture de *Hedysarum*

coronarium qui serait d'un grand secours pour l'élevage algérien en raison de son rendement et de sa résistance à la chaleur et au stress hydrique, et cela pour objectif de fournir une nouvelle source de fourrage pour les agricultures en produisant et commercialisant au plus-tard ses graines.

Après l'étude des caractéristiques et les exigences de ces espèces, l'évaluation du sol de la région, la collecte des semences du nord algérien (Sétif, Tizi-Ouzou, Biskra) et l'installation du plan expérimental, nous voulons évaluer un ensemble de paramètres biométriques et agronomique pour arriver à une conclusion générale qui va nous permettre d'utiliser ou cultiver telle ou telle espèce vu son adaptabilité et son aptitude à une production fourragère importante et de qualité.

2.2.2. Evaluation de la germination des 3 espèces du *sulla*

Après le semis et le début de l'irrigation, nous avons évalué la germination des espèces cultivées, et contrôlé le problème de dormance. Tout d'abord, nous avons commencé par un test de germination de fait que nous sommes en train d'utiliser les semences pour la première fois.

Le semis a été réalisé à l'automne, le 26 novembre 2020. Les premiers plants ont germé vers le 02 décembre 2020, soit 7 jours après le semis pour les trois espèces cultivées. La levée des plants a été observée vers le 10/12/2020, soit vers le 15^{ème} JAS.

La dormance et la dureté des graines ont été observé aussi dans cet essai chez les trois espèces, suite au problème de la perméabilité tégumentaire, la période de récolte et l'intervalle du temps entre la récolte des graines et le semis (qui doit être suffisamment longue).

2.2.3. Evaluation de la croissance et de développement des 3 espèces du *sulla*

Nous avons choisi 4 dates successives moyennement éloignées pour évaluer l'évolution, la cadence et la cinétique de la croissance des plantes après la germination (**Tableau 14**). Les premiers comptages sont illustrés dans le tableau suivant:

Tableau 14 : Evolution du nombre des plants en croissance des 3 espèces du *sulla*

	02 janv. 2021	20 janv. 2021	10 févr. 2021	20 févr. 2021
<i>H. carnosum</i> (H1)	30	33	25	27
<i>H. coronarium</i> (H3)	24	29	28	22
<i>H. flexuosum</i> (H2)	4	7	7	7

D'après le tableau précédent, nous remarquons que le nombre des plants levés est très faible.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

* H1 et H3 assurent un bon démarrage, mais on note des pertes importantes des plants au cours de développement. Signalons que H1 est provenu de la wilaya de Biskra qui est une région à conditions climatiques qui se ressemblent à la région de Ghardaïa, malgré que ça, les plants ont manifesté une souffrance dans la croissance dans le départ seulement, car on a noté une activité intéressante dans les phases et les stades qui suivent.

* H2 manifeste un nombre constant de plants qui ont resté jusqu'à la sénescence. C'est un signe de départ que cette espèce présente une forme d'adaptation dans la région.

Le phénomène de la perte des individus (plants) persiste toujours sans avoir designer la cause principale. Mais, pour éviter le manque des observations au moments de la prise des donnée, on est obligé de renouveler les plants perdus. Un re-semis a été effectué les 30/12/2020 pour les espèces concernées dans la limite de la disponibilité des semences.

Au cours du cycle végétatif des plantes cultivées du sulla, nous avons surveillé la croissance et le développement en tenant en compte les différents stades cités dans la bibliographie, pour chaque stade nous enregistrons la date de son apparition sur le terrain. Ces observations viennent bien évidemment au faisant des visites systématiques sur le champ. A partir de ces dates, nous calculons le nombre des jours entre une date référentielle (date de semis) et le stade observé (**Tableau 15**). Pour chaque critère, nous allons remarquer des différences entre les espèces cultivées.

Tableau 15 : Caractéristiques culturelles des 3 espèces du *Hedysarum* cultivées dans la région de Ghardaïa

	<i>H. carnosum</i> (H1)	<i>H. coronarium</i> (H3)	<i>H. flexuosum</i> (H2)
Critère / stade végétatif	Nombre de jours après le semis		
Date de semis	26/11/2020		
Germination	7 JAS	7 JAS	7 JAS
Levée	15 JAS	15 JAS	15 JAS
Apparition de la 1 ^{ère} feuille simple (50%)	27 JAS	29 JAS	28 JAS
Apparition de la 2 ^{ème} feuille simple (50%)	32 JAS	34 JAS	34 JAS
Apparition de la 1 ^{ère} feuille composée	38 JAS	43 JAS	44 JAS
Apparition de la 1 ^{ère} ramification	55 JAS	61 JAS	62 JAS
Bouton floral (50%)	87 JAS	89 JAS	89 JAS
Floraison	100 JAS	129 JAS	115 JAS
Durée de la phase florale	13 jours	40 jours	26 jours

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Formation des gousses	115 JAS	131 JAS	146 JAS
Maturation des graines	156 JAS	161 JAS	172 JAS
Durée de la maturité des graines	40 à 43 jours	31 à 34 jours	26 à 29 jours
Fleurs/inflorescence	45,8 ± 15	40 ± 12	30,4 ± 10
Inflorescences/plante	38 ± 10	103,75 ± 20	20 ± 5

D'après le tableau 15, on note les remarques suivantes :

* H1 manifeste une vitesse de croissance et de développement très remarquable pour tous les stades du cycle végétatif et reproducteur. Cela revient certainement à la similitude d'habitats, entre la région d'origine "Biskra" et la nouvelle région de culture "Ghardaïa".

* H2 a présenté une croissance très lente au démarrage, mais dans les stades avancés on a enregistré un nombre et une forme importante des feuilles, des feuilles charnues, des ramifications... cela peut nous confirmer un signe primitif de son adaptation dans ce milieu, et nous a donné une espérance pour une production fourragère intéressante quantitativement et qualitativement. D'après Kadi (2021, *comm. person.*), il est intéressant d'investir dans cette plante selon l'état de sa croissance.

* H3 n'a pas exprimé une différence entre cette étude et nos études précédentes. Sur l'ensemble des observations et sur tous les stades examinés.

* Les conditions climatiques, surtout la température et l'humidité du sol, ont une influence directe et immédiate sur la croissance et le développement des végétaux. On observe souvent une accélération du cycle de la vie et un raccourcissement des phases d'une plante donnée lorsque les températures augmentent graduellement dans les mois chauds. Autrement dit, une plante achève sa phase de la floraison, à titre d'exemple, dans une durée donnée (nombre de jours déterminé) dans son climat naturel humide par exemple, elle achève la même phase dans une durée nettement inférieure dans un climat aride ou hyper-aride. C'est une stratégie adaptative et fonctionnelle adoptée par la plante pour garantir et assurer son existence et son dispersion dans le temps et dans l'espace.

* **Fonctionnellement**, la production d'une espèce donnée d'un nombre important d'inflorescences dans une nouvelle zone qui ne l'appartient pas (zone d'introduction) est expliquée par le fait que chaque individu dépense son énergie à la production de la semence qui assure sa continuité dans les années qui suivent ; or la fleur est un outil transitoire indispensable pour la production de semences.

* Issolah et Khalfallah (2010) ont conduit à Alger une culture de 14 populations algériennes du *Sulla* des origines différentes, ils trouvé que le nombre d'inflorescences totales par plante a varié de 16,63

(population d'El-Tarf) à 67,28 (population de Bejaïa), avec une moyenne de 37 inflorescences. Malgré le site de culture est naturel pour le sulla, mais le nombre d'inflorescences par plante reste pratiquement faible chez ces écotypes.

* La variation de ce paramètre entre les études revient essentiellement à la perturbation au niveau des précipitations d'une année à une autre (Bullitta *et al.*, 2000).

2.2.4. Evaluation de la qualité et de la production fourragère des paramètres agronomiques

Le matériel et les méthodes utilisées pour cette partie sont présentés dans la partie II chapitre 1. Ce chapitre traite les états aussi bien biométriques qu'agronomiques des trois espèces du sulla cultivées dans la région de Ghardaïa, destinées à produire de fourrages. Une évaluation des potentialités fourragère des espèces introduites (non autochtones) a été nécessaire en vue d'une caractérisation de ce matériel biologique.

Les paramètres d'évaluation de la production herbagère ont été déterminés comme suit:

❖ 2.2.4.1. Hauteur printanière des plantes

La hauteur de la plante est indicateur important de l'histoire de la vie des plantes, elle explique leur aptitude à capturer la lumière naturelle (Lavorel et Grigulis, 2012). Elle est considérée comme une composante importante du rendement des espèces fourragères, et comme un critère de choix des génotypes au moment de la sélection (Chabouni *et al.*, 2019). Elle nous donne une idée sur la vitesse de la croissance surtout entre les coupes, et donne aussi une estimation du fourrage produit.

Au moment de l'arrachage des plants, la hauteur des plantes était clairement différente entre les trois espèces cultivées du sulla. La valeur la plus faible est enregistrée par *H. carnosum* avec 38,29 cm suivi par *H. flexuosum* avec une hauteur de 67,16 cm et finalement la hauteur la plus élevée est donnée par *H. coronarium* 69,23 cm. La différence entre la première et la dernière valeur est de 80,98%. Ben Jeddi (2005) et Issolah et Yahiaoui (2008) ont trouvé des valeurs de la hauteur des plantes faibles que nos valeurs chez quelques populations de *H. coronarium* en Tunisie et en Algérie (32 cm et 12,5 cm respectivement). La hauteur du sulla peut augmenter jusqu'à 160 cm (Ryley *et al.*, 2004), elle renferme plusieurs tailles et formes de port, allant de type prostré qui peut être mieux adapté au pâturage jusqu'à le semi-érigé à érigé qui peut servir au foin ou même à l'engrais vert (Ryley *et al.*, 2004). La croissance en hauteur des plantes est perturbée par les coupes, elle diminue de 68,5% entre deux coupes successives (Achichi *et al.*, 2021).

RÉSULTATS ET DISCUSSION

L'analyse de la variance montre une différence hautement significative entre les espèces ($p < 0,001$) au seuil de 5%. La hauteur des plantes cultivées mesurée à la fin de l'essai n'est pas significative entre *H. coronarium* – *H. flexuosum* ($p > 0,05$), alors qu'elle est hautement significative entre *H. flexuosum* – *H. carnosum* et *H. coronarium* – *H. carnosum* (**Tableau 16**).

Tableau 16 : Comparaisons multiples de Tukey avec une moyenne de confiance de 95% concernant la hauteur des plantes cultivées du sulla

	Diff.	Inférieur	Supérieur	<i>p</i> adj
<i>Hedysarum flexuosum</i> - <i>Hedysarum carnosum</i>	28.87295	8.457254	49.28865	0.0040012
<i>Hedysarum coronarium</i> - <i>Hedysarum carnosum</i>	30.94095	10.525254	51.35665	0.0020255
<i>Hedysarum coronarium</i> - <i>Hedysarum flexuosum</i>	2.06800	-17.992615	22.12862	0.9655568

Ces valeurs reflètent la réaction des plantes en relation avec la nouvelle zone de croissance. Plusieurs études montrent clairement que la disponibilité de l'eau et des nutriments dans le sol améliore considérablement la hauteur des plantes, mais la valeur très faible enregistrée par *H. carnosum* réfère à son non-adaptabilité aux conditions climatiques de la région. Probablement, la région d'origine (où nous avons ramené ces espèces) a un effet considérable sur la croissance et le développement des espèces surtout en hauteur.

❖ 2.2.4.2. Nombre de feuilles et de ramifications des plantes des espèces cultivées

La ramification et le nombre des feuilles par tige ou par plante sont considérées des indicateurs agronomiques de la bonne croissance et de production végétative, les plantes les plus ramifiées sont douées d'un bon développement (Ben Jeddi, 2005) et constitue un critère de choix des fourrages. Le niveau de ramification permet à la plante de mieux supporter la charge végétative et les dents des animaux herbivores au broutage.

L'analyse de la variance a montré l'existence d'une différence très hautement significative entre les espèces étudiées ($p = 0,0002$) pour le paramètre nombre des feuilles par plante

L'analyse de la variance a révélé d'une différence hautement significative entre les espèces étudiées ($p = 0,007$) pour le paramètre nombre des ramifications par plante.

Le calcul du test de Kruskal-Wallis nous a donné les résultats suivants:

Chi-squared = 15.045, df = 2, *p-value* = 0.000541 pour les feuilles.

Chi-squared = 9.6434, df = 2, *p-value* = 0.008053 pour les ramifications.

La valeur du *p-value* trouvée, traduit l'existence d'une différence hautement significative entre les médianes des trois espèces étudiées (**Figure 29**).

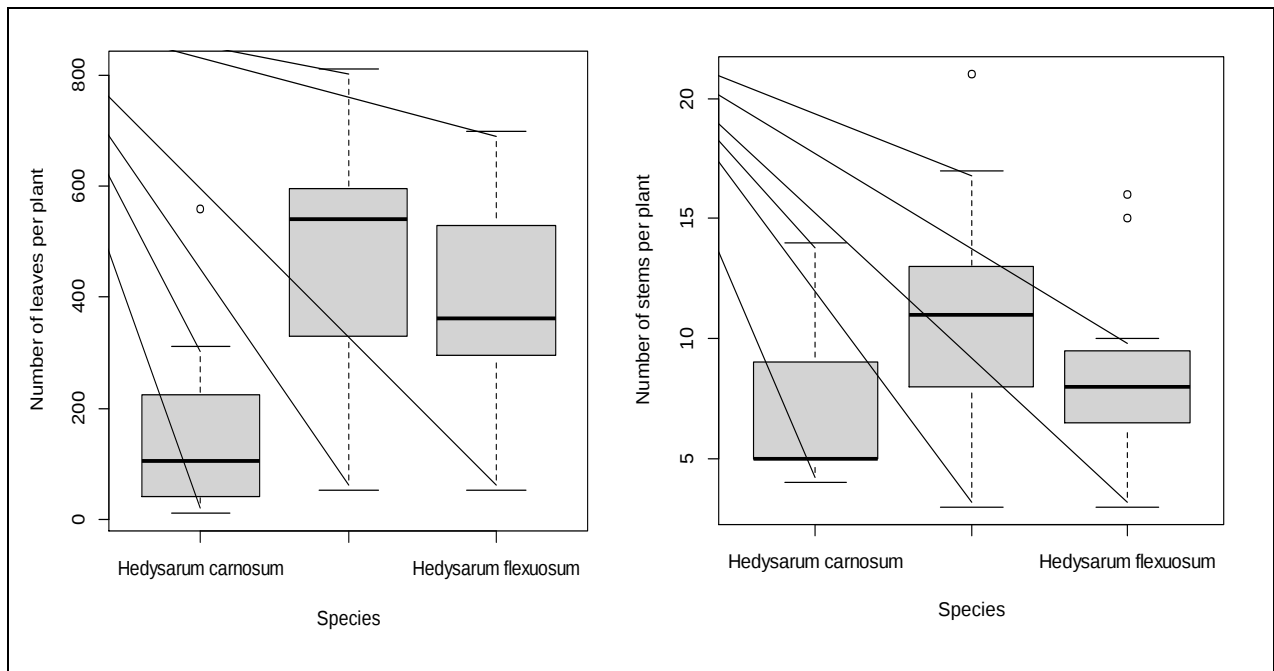


Figure 29 : Nombre des feuilles et des ramifications par plante pour les espèces étudiées de *Hedysarum*

D'après les résultats obtenus, ces deux traits fonctionnels sont positivement corrélés ($r=0,67$; $p<0,00$). Cela veut dire que les espèces qui ont un nombre élevé en nombre de ramifications auront systématiquement un nombre élevés en nombre des feuilles. *H. carnosum* a enregistré le nombre le plus faible des feuilles et des ramifications avec une moyenne de 155,07 feuilles par plante et 6,57 ramifications par plante. La valeur la plus élevée était de la part de *H. coronarium* qui a enregistré une moyenne de 454,6 et 11,07 feuilles et ramifications par plante successivement. La moyenne intermédiaire est manifestée par *H. flexuosum*, avec un nombre de 389,8 feuilles par plante et 8,53 ramifications par plante (**Figure 29**). Ben Jeddi (2005) a trouvé chez *H. coronarium* un nombre élevé de ramifications atteint 15,2 rameaux/plante.

❖ 2.2.4.3. Biomasse fraîche des feuilles et des tiges des espèces cultivées du sulla

La biomasse fraîche constitue toute la matière végétale aérienne produite par les plantes (feuilles et tiges), elle donne une signification sur la production végétative mais elle n'est pas exacte à cause de la teneur en eau des cellules végétales qui est variable d'une cellule à une autre, d'un tissu à un autre... Les valeurs de la biomasse fraîche des feuilles et des tiges sont très importantes pour les espèces étudiées, en plus elles ont une corrélation positive et hautement significative ($r=0,718$; $p<0,000$). L'analyse de la variance ANOVA n'a indiqué aucune différence significative entre les espèces pour

RÉSULTATS ET DISCUSSION

ces deux paramètres ($p=0,98$ et $p=0,49 > 0,05$ respectivement). Cela est interprété par le fait que les trois espèces ont des biomasses fraîches des feuilles et tiges très proches.

Par ailleurs, le poids de la matière fraîche des feuilles présente 57,01% du poids frais de la plante entière chez *Hedysarum carnosum*. Tandis que elle présente seulement 53% et 49% du poids frais total pour *Hedysarum flexuosum* et *Hedysarum coronarium* respectivement. Cela est remarqué sur le terrain par la richesse des feuilles et des tiges en eau (feuilles charnues).

Le poids frais moyen des feuilles le plus élevé est obtenu par *H. carnosum* (130,01g) suivi par *H. flexuosum* avec 126,61g et en fin on trouve *H. coronarium* (124,92g) (**Figure 30**).

Alors que, le poids frais moyen des tiges le plus élevé est donné par *H. coronarium* avec 121,64g, *H. flexuosum* et *H. carnosum* ont montré des poids de 102,66 g et 96,11g respectivement (**Figure 30**).

Selon les résultats présentés précédemment, on trouve que l'espèce *Hedysarum flexuosum* occupe la 2^{ème} place entre les trois espèces étudiées pour ces paramètres. Zirmi-Zembri and Kadi (2020) ont enregistré des valeurs très faibles du poids frais des feuilles et des tiges sur cinq populations de *Hedysarum flexuosum* de la région de Kabylie : allant de 30,42g à 31,39g pour le poids frais des feuilles; et de 56,76g à 65,19g pour le poids frais des tiges.

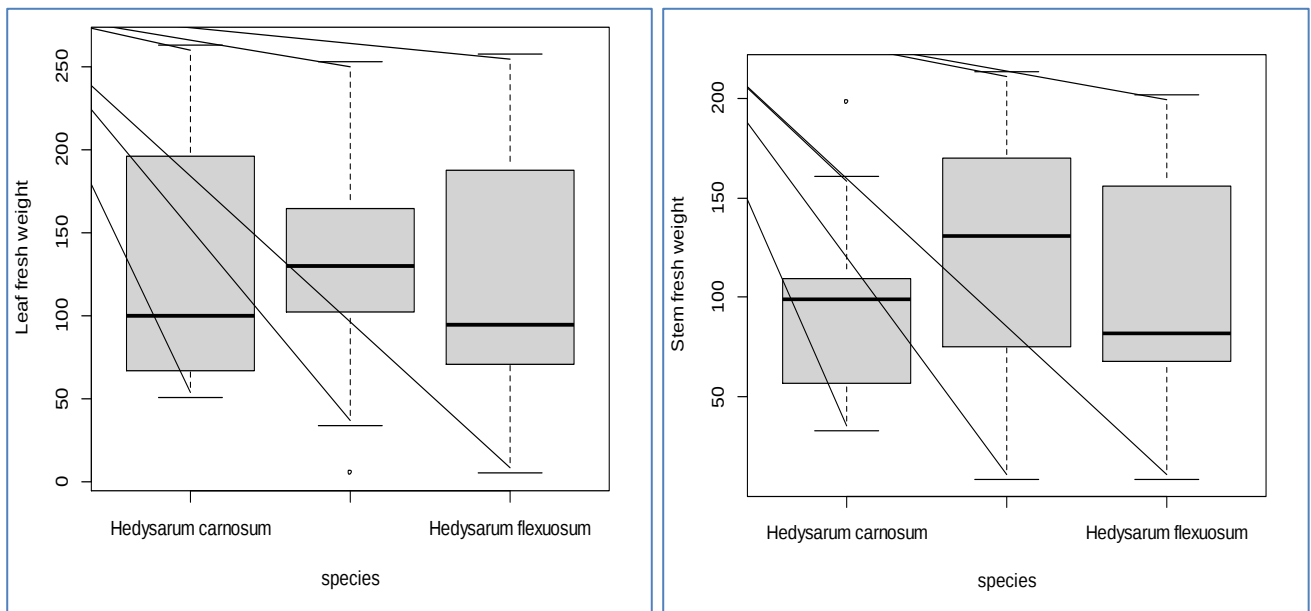


Figure 30 : Boîtes à moustache du poids frais des feuilles et des tiges pour les trois espèces étudiées du sulla, représentent la médiane (bande noire), l'interquartile (boîte grisée) et les queues de distributions en pointillés

D'après les travaux de Rabhi *et al.* (2017) sur le sulla, ces paramètres sont influencés négativement (décroissement) dans les sols pauvres en éléments minéraux essentiellement le Mg^{++} . Ces mêmes auteurs ont noté que le poids frais du sulla (*Hedysarum carnosum*) est réduit clairement de 43,6% dans le traitement de déficience comparé au témoin.

❖ 2.2.4.4. Rapport feuilles sur tiges des espèces du sulla cultivées

Le rapport feuilles sur tiges est annoncé comme une marque de référence de l'utilisation d'une telle plante comme fourrage ou aliment de bétails, en plus c'est un facteur important pour déterminer la qualité, la quantité et la consommation de fourrage (Alexander *et al.*, 2001).

Ce trait nous permet de comprendre si la plante a investi beaucoup d'énergie pour produire énormément des feuilles par rapport aux tiges ou le contraire. Un rapport feuilles/tiges élevé d'une plante est doté d'une grande importance, non seulement grâce à sa richesse en protéines brutes et à sa digestibilité des feuilles par rapport aux tiges, mais aussi par préférence animale pour les feuilles (Trindade *et al.* 2007 cité par Gomide *et al.*, 2014). Les espèces cultivées montrent des valeurs très proches de ce rapport; pas de différence significative entre-elles ($p > 0,05$) : 1,25 ; 1,40 et 1,44 pour *H. coronarium*, *H. flexuosum* et *H. carnosum* respectivement (**Figure 31**). Nous trouvons que ces valeurs sont très intéressantes si on les explique dans le contexte de la production fourragère.

La littérature qui s'intéresse aux cultures fourragères précise que si une plante présente un rapport feuilles sur tiges supérieur à 1 cela signifie qu'elle produit un nombre important de feuilles (un poids frais élevé par la suite) par rapport aux tiges (nombre et poids). Si c'est le cas, ce fourrage va être mieux apprécié et préféré par les animaux (palatable).

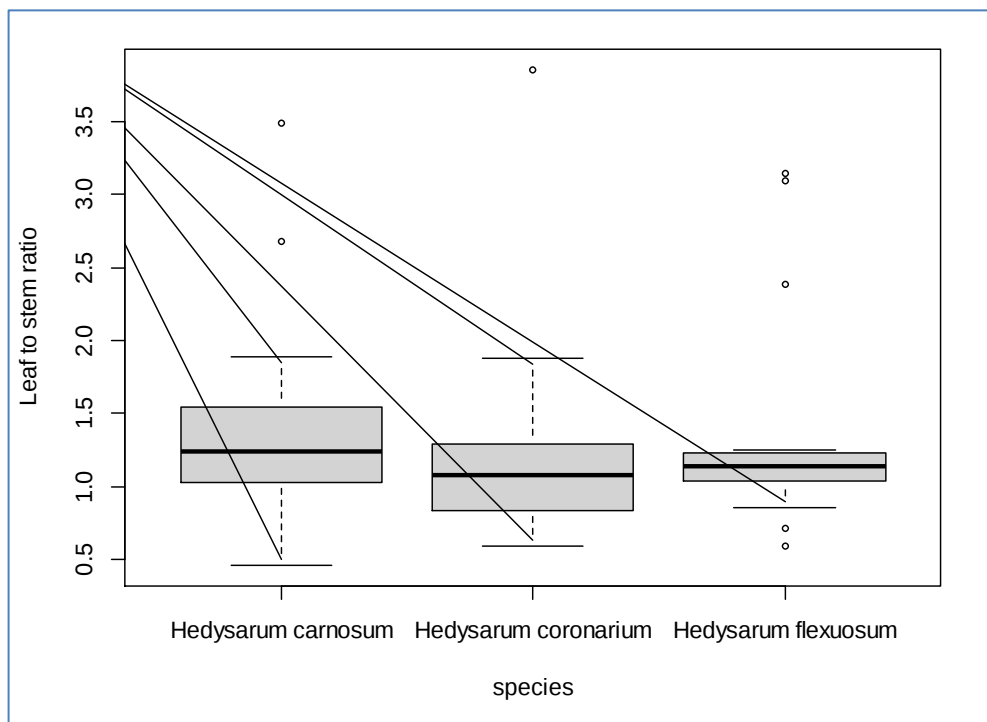


Figure 31 : Boîtes à moustaches du rapport feuilles sur tiges des 3 espèces étudiées du sulla

D'après la Figure 31, on remarque l'existence des valeurs extrêmes très élevées qui sont enregistrées par les trois espèces étudiées: 3,855 pour *Hedysarum coronarium* suivi par la valeur de 3,487 pour *Hedysarum carnosum* (il a enregistré au même temps la valeur minimale 0,459) et en fin 3,138 pour

Hedysarum flexuosum. La différence entre la valeur moyenne la plus élevée et l'intermédiaire et la plus faible représente un pourcentage de 18,6% et de 12,7% respectivement.

Ce paramètre est influencé par le pourcentage de l'interception lumineuse et le pâturage (Gomide *et al.*, 2014). Ces auteurs précisent que la hauteur post-pâturage d'une plante de 30cm entraîne une augmentation de rapport feuilles/tiges par rapport une plante de 50cm (1,22 vs 1,08 respectivement). Moussaouali et Hamdi-Aïssa (2017) ont trouvé des valeurs proches à celles-ci dans leur expérience conduite sur *Hedysarum coronarium* dans la région de Ghardaïa (1,28 en moyenne); dans le même sens, Abdelguerfi (2002) a enregistré des ratios variant de 0,44 à 1,32 pour quelques populations algériennes du sulla. Dans l'étude de Zirmi-Zembri et Kadi (2020) sur *Hedysarum flexuosum*, ils ont trouvé des valeurs similaires à nos valeurs pour deux stades phénologiques différents: 0,54 au stade début floraison et 0,44 au stade floraison. Borreani *et al.* (2003) a rapporté que les valeurs du rapport feuilles/tiges sur *Hedysarum coronarium* fluctuent entre les stades phénologiques et les années allant de 5,6 au stade fin végétation à 0,2 au stade formation des graines. Le ratio feuilles/tiges se diminue avec le développement des plantes, cela est dû principalement à l'accumulation de la cellulose brute au niveau des tiges par rapport aux feuilles (Zirmi-Zembri et Kadi, 2020).

❖ 2.2.4.5. Rendement en fourrage sec (t MS/ha)

Les espèces du sulla ont une production fourragère élevée et un rendement en fourrages frais et secs très bénéfique. Dans cet essai, les trois espèces cultivées du *Hedysarum* ont produit des rendements très importants en fourrages: 2,926 ; 3,177 et 3,289t MS/ha pour *H. carnosum*, *H. flexuosum* et *H. coronarium* respectivement (**Figure 32**). L'analyse de la variance n'a révélé aucune différence significative entre les espèces pour la matière sèche et le rendement fourrager ($p=0,882 > 0,05$).

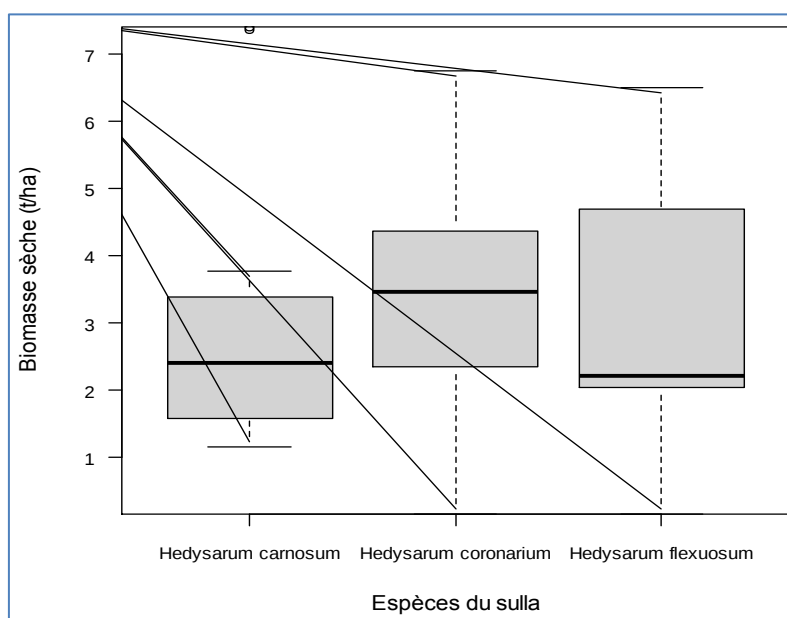


Figure 32 : Boîtes à moustache du rendement en fourrage sec (t/ha) des espèces étudiées

La biomasse fraîche estimée pour les trois espèces du sulla est comprise entre 17,10 et 19,12 t/ha. L'espèce *H. coronarium* a enregistré la quantité la plus élevée, suivi par *H. carnosum* et enfin *H. flexuosum*. Si on suppose un fauchage de 3 fois par an, cette biomasse devient autour de 51,3 à 57,4 t/ha/an. Chez Achichi *et al.* (2021), les cumules de la biomasse fourragère verte sont compris entre 41,7 et 50,3 t/ha/an. Nous remarquons que les deux facteurs biomasse fraîche estimée et rendement en MS évoluent simultanément. Les populations algériennes du sulla venant des régions à altitudes élevées sont caractérisées par un développement végétatif faible (Issolah *et al.*, 2014).

Dans une étude récente réalisée sur *Hedysarum coronarium* en Algérie, le rendement en fourrage enregistré est entre 3 et 4t MS/ha (Achichi *et al.*, 2021). Ces résultats sont très proches à nos valeurs (3,289t MS/ha). Selon l'étude réalisée par Moussaouali et Hamdi-Aïssa (2017), *Hedysarum coronarium* produit énormément de fourrage dans la région de Ghardaïa, ils ont trouvé un rendement fourrager de 3,392t MS/ha contre 2,446t MS/ha dans son habitat naturel indigène. Ben Jeddi (2005) a signalé un maximum de rendement atteint par *Hedysarum coronarium* au stade floraison qui est de 6,2 t MS/ha, soit 40 t/ha de la matière fraîche (verdure) et un taux de matière sèche de 15,5%. Dans les expérimentations du sulla cultivé en Tunisie, les rendements en fourrage sec varient de 0,974 à 5,490t MS/ha (Slim *et al.*, 2012). Ce paramètre est influencé par quelques conditions environnementales et agronomiques de la région de culture telles que la température, les précipitations, la variété cultivées et l'année de l'exploitation (la 1^{ère} année ou la 2^{ème}). D'ailleurs, les rendements en fourrage sec du sulla sont étroitement reliés aux stades phénologiques des plantes dont le fourrage est exploité (Kadi *et al.*, 2011). La quantité de la biomasse fraîche et sèche chez les légumineuses, y compris le sulla, est influencée par la défoliation (le fauchage), parce que celle-ci affecte la surface foliaire et par la suite le taux d'interception lumineuse (Achichi *et al.*, 2021). D'où, nous conseillons de prendre en compte la hauteur de la coupe qui doit être largement suffisante (5 cm), pour laisser un minimum de feuilles assurant le démarrage de la matière verte. Alors que un pâturage bien géré abouti à la formation d'un nombre important de repousses en maximisant ainsi le nombre des bourgeons axillaires (Rys *et al.*, 1988).

Les expériences agricoles confirment qu'un fourrage à valeur élevée de la matière sèche est un fourrage de qualité, car un taux de MS faible gêne sa bonne conservation.

❖ 2.2.4.6. Surface spécifique foliaire (SLA)

La surface foliaire spécifique, dans la plupart des cas, est considérée comme un indicateur brillant de l'activité photosynthétique et du taux de croissance relative potentiel. Dans notre étude, le *p-value* trouvé reflète l'existence d'une différence hautement significative entre les moyennes de la SLA de

ces espèces du sulla (**Tableau 17**). La valeur la plus faible trouvée chez *Hedysarum flexuosum* peut être expliquée par la teneur élevée en eau au niveau des feuilles, parce que ce paramètre est calculé après le séchage des feuilles qui aboutit à une perte énorme du poids de ces feuilles riches en eau. Mais, en général, les valeurs de ce trait de SLA donnent une idée claire sur l'adaptabilité de ces trois espèces dans le nouveau habitat, surtout *H. coronarium* et *H. carnosum*, lorsque on les compare avec d'autres valeurs de SLA des feuilles prises de leur habitat d'origine. Malgré la présence de la salinité dans le sol, la surface de la feuille n'est pas affectée par ce problème majeur (Tibaoui *et al.*, 2018) largement répandu dans les régions arides et très chaudes. Moussaouali et Hamdi-Aïssa (2017) ont trouvé une valeur de 14,738 m²/kg MS chez *Hedysarum coronarium* cultivé dans la région de Ghardaïa. Cette valeur est étroitement similaire à nos valeurs. A cet effet, ils ont considéré que *H. coronarium* a adopté une stratégie fonctionnelle adaptative pour le nouveau site où elle est installée. Selon Hodgson *et al.* (2011), ce paramètre est considéré comme un trait parfait et facile des plantes qui est utilisé pour évaluer la fertilité du sol, ainsi nous informe sur les stratégies écologiques des plantes spontanées et cultivées.

Tableau 17 : Valeurs de SLA enregistrées entre les trois espèces cultivées de *Hedysarum* (m²/kg)

	Low value	High value	average
<i>Hedysarum coronarium</i>	6.710	21.962	13.075
<i>Hedysarum flexuosum</i>	6.136	20.747	8.901
<i>Hedysarum carnosum</i>	7.167	23.144	13.088

D'après le tableau, *Hedysarum flexuosum* a enregistré la valeur la plus faible (8,901m²/kg). Ces valeurs reviennent certainement à la teneur élevée en eau stockée dans les feuilles (par exemple: le poids frais d'une feuille = **4,71g** et le poids sec de la même feuille = **0,55g**; donc la teneur en eau de cette feuille est de **88,32%**). Le maximum de SLA est observé chez les deux herbes annuelles *Hedysarum coronarium* et *Hedysarum carnosum* qui ont pratiquement enregistrées des valeurs égales avec des moyennes de 13,075 et 13,088 m²/kg respectivement. La teneur en eau des feuilles de ces deux herbes est dans l'ordre de 83,04%. La différence entre la valeur la plus élevée et la valeur la plus faible représente un pourcentage de 47,04%.

Le calcul du test de *Kruskal-Wallis* nous a donné les résultats suivants :

Chi-squared = 44.601, df = 2, p-value = 2.065e-10.

La valeur du *p-value* trouvée traduit l'existence d'une différence hautement significative entre les moyennes des trois groupes (**Figure 33**).

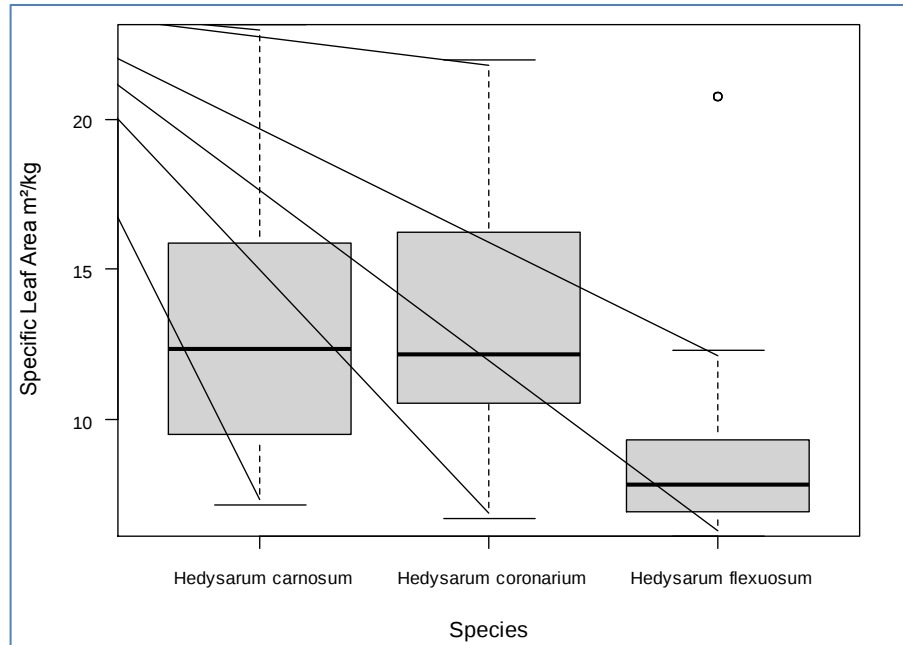


Figure 33 : Boîtes à moustache présentant la différence entre les espèces du sulla en SLA, représentent la médiane (bande noire), l'interquartile (boite grisée) et les queues de distributions en pointillés

Dans le but de déterminer la source de cette différence, ou bien entre quelle groupes cette différence existe réellement, nous avons réalisé le test de comparaison multiple avec la méthode d'ajustement de Bonferroni (**Tableau 18**).

Tableau 18 : Niveau de différence des valeurs de la SLA entre les espèces cultivées

	<i>Hedysarum carnosum</i>	<i>Hedysarum coronarium</i>
<i>Hedysarum coronarium</i>	1	-
<i>Hedysarum flexuosum</i>	4.1e-08	1.3e-08

Ce test nous a dévoilé une différence très hautement significative entre *H. carnosum* et *H. flexuosum* ($p < 0,000$) d'un côté, et entre *H. coronarium* et *H. flexuosum* ($p < 0,000$) de l'autre côté. Alors que, entre *H. carnosum* et *H. coronarium*, le test n'a dévoilé aucune différence significative entre ces espèces ($p > 0,05$).

❖ 2.2.4.7. Teneur en matière sèche foliaire (LDMC)

L'analyse de la variance de la teneur en matière sèche des feuilles a révélé une différence hautement significative entre les espèces étudiées et entre les blocs ($p = 2.2e-16$; $p = 8.844e-05$). *H. coronarium* a montré une valeur très élevée de la LDMC entre les trois espèces du sulla étudiées. D'autre part, *H. flexuosum* et *H. carnosum* ont enregistré les valeurs faibles (**Figure 34**). Les valeurs de LDMC sont variantes entre 70,48 et 126,37 mg/g pour l'espèce *H. carnosum* avec une moyenne de 101,97 mg/g;

de 36,85 à 139,10 mg/g pour *H. flexuosum* avec une moyenne atteinte 116,24 mg/g; et pour *H. coronarium* qui a manifesté la valeur la plus importante, elles varient de 128,52 et 248,57 mg/g avec une moyenne de 177,22 mg/g. Notons que les valeurs enregistrées par *H. coronarium* sont largement proches à celles trouvées dans les travaux de Moussaouali et Hamdi-Aïssa (2017) à Ghardaïa, ils ont trouvé une moyenne de 172,86 mg/g. Cet indice LDMC est une caractéristique reflétant la capacité du stockage de la matière organique synthétisée au niveau des feuilles ou bien généralement le long de la vie des feuilles (Chalmandrier, 2008). Les valeurs fortes en LDMC caractérisent les plantes dont leurs organes foliaires accumulent efficacement les nutriments par la photosynthèse et constituent d'importants pools de stockage, donc avec une faible matière première de la genèse des tissus. En général, le même auteur trouve que les plantes type herbacées sont à fort SLA et faible LDMC.

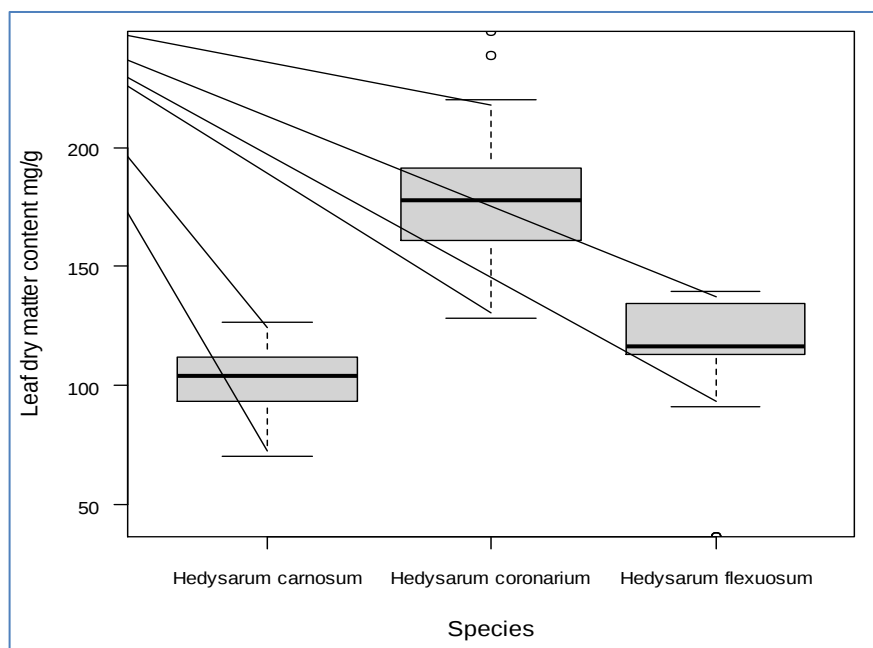


Figure 34 : Boîtes à moustache présentant la différence entre les espèces du sulla en LDMC

Corrélation entre les indices SLA et LDMC

L'étude de la corrélation entre SLA et LDMC nous amène à conclure qu'elle existe une relation étroite entre ces deux paramètres, qui sont des indices très importants dans l'écologie des plantes (Figure 35). Ils sont considérés comme des traits-indicateurs des stratégies de l'utilisation des ressources naturelles, parce qu'ils sont associés et reliés avec plusieurs aspects critiques de la vie et du développement des plantes (Garnier *et al.*, 2001). Quelques études conduites dans des conditions environnementales contrôlées ont montré les rôles importants joués par ces traits fonctionnels dans l'explication de la variation en taux de croissance relative potentiel (*RGR*) et le comportement écologique des plantes (Li *et al.*, 2005). Donc, il est intéressant d'évaluer ces traits pour diverses espèces végétales dans différents environnements. Dans la littérature de l'écologie fonctionnelle des

végétaux, quand on trouve une espèce à indices "SLA fort – LDMC faible" signifie que cette espèce possède une production rapide en biomasse; alors que en cas de "SLA faible – LDMC fort" l'espèce possède un mécanisme efficient de conservation des nutriments.

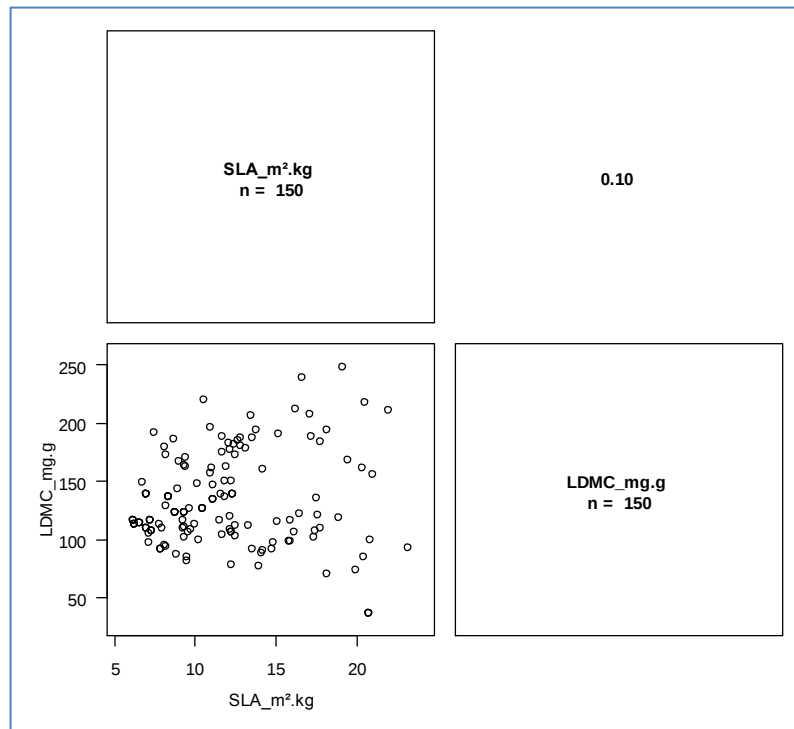


Figure 35 : Relation entre les indices fonctionnels : SLA et LDMC

Les végétaux à fort SLA et faible LDMC sont des plantes dont la croissance est rapide, et l'acquisition des ressources est efficace à court terme par rapport à la matière organique investie. En revanche, les structures foliaires ont une longévité faible car elles sont plus fragiles (plus sensible à la dessiccation par exemple). A l'inverse, les plantes à LDMC fort et SLA faible présentent une croissance moins rapide, mais elles possèdent des feuilles à longévité plus grande; la chose qui permet à ces feuilles de stocker les nutriments nécessaires à la croissance surtout l'azote (Westoby 1988).

Corrélation entre les paramètres (entre les espèces confondues)

Dans la présente étude, des effets significatifs de l'environnement sont observés chez la majorité des traits de croissance et du développement entre les espèces étudiées. La croissance ou la relation entre les traits morphologiques mesurés et leur niveau de signification ont été surveillés (Figure 36).

Pour les 49 corrélations possibles entre les paramètres mesurés, 39 entre eux sont significatifs (Tableau 19) avec des valeurs de corrélation allant de la plus faible 0,181 ($p < 0,000$) vers la plus forte 0,823 ($p < 0,000$).

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Tableau 19 : Coefficients de corrélation entre les paramètres des espèces étudiées au seuil de 5%

	Htr plante (cm)	Nbr ramification	Nbr feuilles	Pds frais des feuilles (g)	Pds frais des tiges (g)	Feuilles/tiges ratio	Rndt en MS (t/ha)
Htr plante (cm)	1	0.56013561	0.8236705	0.43432040	0.67123056	-0.3226296	0.671236178
Nbr ramification	0.56011241	1	0.6717868	0.38777440	0.41462692	-0.0321981	0.414632193
Nbr feuilles	0.8236173	0.67178679	1	0.55045476	0.64886468	-0.1559882	0.648867937
Pds frais des feuilles (g)	0.43433573	0.38777440	0.5504548	1	0.71813314	0.18114886	0.718133402
Pds frais des tiges (g)	0.67124564	0.41462692	0.6488647	0.71813314	1	-0.4061841	1.000000000
Feuilles/tiges ratio	-0.3226894	-0.0321981	-0.1559883	0.18114886	-0.406184	1	-0.406185355
Rndt en MS (t/ha)	0.67123744	0.41463219	0.6488679	0.71813340	1.00000000	-0.4061853	1

Illustrée dans le tableau, la corrélation la plus faible (négative) et hautement significative est observée entre le poids frais des tiges et le rapport feuilles/tiges ($p < 0,01 = 0,006$), car le rapport feuilles/tiges est un simple rapport entre le poids des feuilles et le poids des tiges qui doit être mathématiquement décroissant lorsque le poids des tiges augment.

Alors que la corrélation la plus forte (positive) et très hautement significative est trouvée entre la hauteur de la plante et le nombre des feuilles ($p < 0,000$). Cette corrélation est pratiquement juste, plus que la hauteur de la plante augmente plus que les nombre des feuilles oscillées sur les tiges est important, et par conséquent le poids frais des feuilles.

Entre le paramètre poids frais des feuilles et le paramètre rapport feuilles/tiges, nous avons noté une corrélation positive mais très faible ($r = 0,181$). À l'opposée, une corrélation négative mais très forte ($r = -0,032$) est enregistrée entre le nombre des ramifications et le rapport feuilles/tiges.

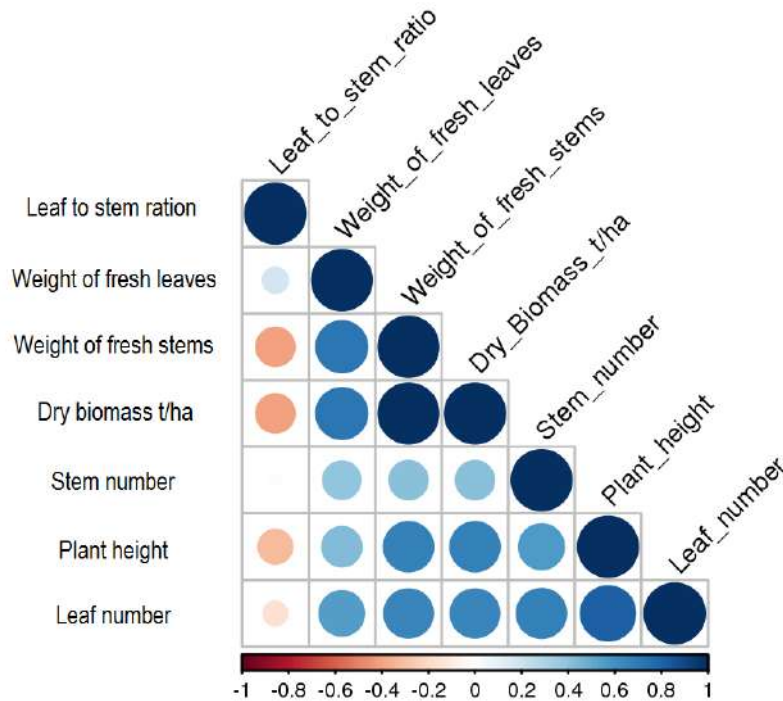


Figure 36 : Corrélogramme entre tous les paramètres mesurés des 3 espèces étudiées de *Hedysarum*

Corrélation entre les paramètres (pour chaque espèce séparément)

*/ pour *Hedysarum coronarium*

Le Tableau 20 présente la relation entre les paramètres mesurés chez *H. coronarium*, afin de déduire les relations fortes et faibles ainsi leur signification.

Tableau 20 : Coefficients de corrélation entre les paramètres étudiés de l'espèce *H. coronarium* au seuil de 5%

	Htr plante (cm)	Nbr ramification	Nbr feuilles	Pds frais des feuilles (g)	Pds frais des tiges (g)	Rndt en MS (t.ha)	Feuilles/tiges ratio
Htr plante (cm)	1						
Nbr ramification	-0.47	1					
Nbr feuilles	0.83	-0.40	1				
Pds frais des feuilles (g)	0.78	-0.52	0.81	1			
Pds frais des tiges (g)	0.68	-0.22	0.76	0.82	1		
Rndt en MS (t.ha)	0.78	-0.41	0.74	0.90	0.85	1	
Feuilles/tiges ratio	0.60	-0.37	0.44	0.49	0.4	0.42	1

D'après le tableau 20, une corrélation négative ($r = -0,52$) est signalée entre le nombre des ramifications et le poids frais des feuilles, la chose qui nous semble impassable et cela nécessite une interprétation spéciale. En réalité, chez une plante quelconque, plus que le nombre de ramifications par plante augmente plus que le nombre de feuilles par ramification et par plante augmente, cela va engendrer une corrélation nettement positive sauf en cas d'une maladie ou une chute de production.

De l'autre côté, on a noté une corrélation positive et très hautement significative entre le poids frais des feuilles et le rendement en matière sèche ($r = +0,90$).

RÉSULTATS ET DISCUSSION

/ pour *Hedysarum flexuosum

Le Tableau 21 présente la relation entre les paramètres mesurés chez *H. flexuosum*, afin de déduire les relations fortes et faibles ainsi leur signification.

Tableau 21 : Coefficients de corrélation entre les paramètres étudiés de l'espèce *H. flexuosum* au seuil de 5%

	Htr plante (cm)	Nbr ramification	Nbr feuilles	Pds frais des feuilles (g)	Pds frais des tiges (g)	Rndt en MS (t.ha)	Feuilles/tiges ratio
Htr plante (cm)	1						
Nbr ramification	0.15	1					
Nbr feuilles	0.64	0.64	1				
Pds frais des feuilles (g)	0.48	0.47	0.71	1			
Pds frais des tiges (g)	0.76	0.12	0.65	0.80	1		
Rndt en MS (t.ha)	0.63	0.34	0.68	0.95	0.89	1	
Feuilles/tiges ratio	-0.45	0.50	-0.05	0.15	-0.37	-0.03	1

D'après le tableau 21, une corrélation négative ($r = -0,45$) est signalée entre la hauteur des plantes et le rapport feuilles/tiges, la chose qui n'est pas logique. D'habitude, dans le monde végétal et des plantes herbacées, on observe le contraire. Car le rapport feuilles/tiges est un simple ratio entre le poids des feuilles et le poids des tiges qui semblerait être croissant avec la hauteur de la plante. Cela nécessite un approfondissement pour arriver à dire une conclusion à cette contradiction.

Selon les deux tableaux n°20 et n°21, on observe que la corrélation la plus importante positive et significative enregistrée chez les deux espèces (*H. coronarium* et *H. flexuosum*) est donné par les mêmes paramètres : les poids frais des feuilles et le rendement en matière sèche. Ce qui pourrait être relié à l'adaptation avec le milieu et la bonne acquisition des nutriments du sol. Ajoutons que même *H. carnosum* a enregistré une corrélation positive remarquable entre ces deux paramètres mais elle n'est pas la plus élevée ($r = 0,79$).

/ pour *Hedysarum carnosum

Le Tableau 22 présente la relation entre les paramètres mesurés chez *H. carnosum*, afin de déduire les relations fortes et faibles ainsi leur signification.

Tableau 22 : Coefficients de corrélation entre les paramètres étudiés de l'espèce *H. carnosum* au seuil de 5%

	Htr plante (cm)	Nbr ramification	Nbr feuilles	Pds frais des feuilles (g)	Pds frais des tiges (g)	Rndt en MS (t.ha)	Feuilles/tiges ratio
Htr plante (cm)	1						
Nbr ramification	0.80	1					
Nbr feuilles	0.83	0.93	1				
Pds frais des feuilles (g)	0.50	0.58	0.7	1			
Pds frais des tiges (g)	0.44	0.55	0.5	0.55	1		
Rndt en MS (t.ha)	0.26	0.29	0.4	0.79	0.70	1	
Feuilles/tiges ratio	0.16	0.14	0.2	0.63	-0.26	0.24	1

D'après le tableau 22, une corrélation négative ($r = -0,26$) est signalée entre le poids frais des tiges et le rapport feuilles/tiges avec une signification très élevée; alors que, on a noté une corrélation positive et très hautement significative entre le nombre des feuilles et le nombre des ramifications ($r = +0,93$).

Conclusion

L'évaluation des caractères phénotypiques (morphologiques) et agronomiques de trois espèces de *Hedysarum* cultivées pour la première fois dans les oasis de la wilaya de Ghardaïa, a révélé un large degré de variabilité et il a montré une adaptation intéressante de ces espèces dans les conditions agro-écologiques de ce nouvel habitat. L'espèce originaire de Sétif *Hedysarum coronarium* est considérée comme une espèce importante de point de vue les traits : hauteur de la plante, nombre des feuilles et des tiges, rendement en fourrage et LDMC. Cependant, *H. flexuosum* occupe la 2^{ème} place concernant l'ensemble des traits à l'exception de la SLA. Ces espèces ont fourni des valeurs intéressantes du rapport feuilles sur tiges (qui avoisine le 0,5) dans cette étude, donc elles peuvent produire des quantités considérables en fourrage vert. La majorité des résultats obtenus dans la présente étude ont confirmé la possibilité de conclure que l'espèce *Hedysarum coronarium* peut produire plus en terme de production en vert par rapport aux autres espèces cultivées, et elle est intéressante pour l'alimentation de bétails et à l'intégration dans le calendrier de la production des fourrages de la région d'étude.

Les espèces du sulla peuvent jouer un rôle important dans le développement durable dans cette région habituellement considérée une zone marginale. Nous souhaitons, par la suite, la continuité par des études et des travaux de recherche pour cerner le sujet, en évaluant la composition chimique de ces espèces pour approuver leur valeur nutritive, et ainsi, extrapoler l'étude à d'autres espèces fourragères du même genre.

2.3. Identification des besoins en nutrition minérale (fertilisation azotée)

En agriculture saharienne, l'apport des éléments fertilisants au sol est élément clé pour la réussite de la culture et la bonne production, vu l'indisponibilité de ces éléments minéraux dans le sol qui est considéré seulement comme un support pour la plante (squelettique). Les apports en engrais et en éléments minéraux pour n'importe quelle culture sont effectués après la quantification des exportations de la culture en azote, en phosphore et en potassium. Sachant que le P_2O_5 et le K_2O sont des engrais de fond incorporés dans le sol avant le semis.

Dans la présente expérience, nous voulons identifier la dose optimale d'azote pour une bonne production du sulla en vert, c'est la fertilisation raisonnée (**Figure 37**). La carence en azote provoque un dysfonctionnement physiologique: plantes chétives, de couleur verte claire, retard de développement des parties succulentes... L'excès d'azote à son tour provoque des problèmes phytosanitaires, qui peuvent conduire à la mort des plantes (toxicité).

Nous avons choisi seulement l'azote vu la pression du temps (les années limitées) parce que chaque élément nécessite un essai individuel soit une campagne agricole complète. Ainsi, l'azote est considéré comme un élément essentiel pour la production végétative (feuilles et tiges), il a un rôle essentiel dans les systèmes de production. Malheureusement, les sols sahariens ne renferment pas de la symbiose du sulla, sinon les quantités d'azote apportées seront certainement basses. L'azote est l'élément le plus exposé au phénomène de lessivage qui revient à sa grande mobilité dans le sol. Ces pertes seront terribles avec les irrigations très abondantes. D'où l'intérêt de fractionner l'engrais azoté en 3 apports de la dose totale; et pour améliorer les taux de protéines il vaut mieux de réfléchir à la possibilité d'un 4^{ème} apport.



Figure 37 : Schéma illustrant l'importance de l'ajustement des apports azotés (Fortier et Tremblay, SD)

2.3.1. Evaluation des paramètres morphologiques

❖ 2.3.1.1. Effet des doses d'azote et des populations sur les paramètres morphologiques

Les premières observations apparentes des résultats obtenus et qui figurent dans le Tableau 23 et sur la Figure 38, montrent qu'il y a une différence entre les traitements (populations cultivées d'une part et doses d'azote adoptées d'une autre part). Nous remarquons d'abord que les paramètres morphologiques sont influencés par les doses de l'azote, où les doses 25u et 37u d'N par hectare ont enregistré les valeurs élevées. De point de vue population, la population de Sétif et d'El-Tarf ont eu des résultats intéressants (**Tableau 23**). Ce tableau présente les moyennes calculées de tous les paramètres mesurés pour chaque écotype et chaque dose.

Tableau 23 : Valeurs moyennes des différents paramètres morphologiques mesurés entre doses et populations

Ecotypes	Doses azote	Hauteur de la plante	Nombre F/P	Nombre T/P	Poids Frais Feuilles	Poids Frais Tiges	Rapport feuilles/tiges
Pop. de Sétif	D0	8.304	24.200	3.800	20.400	12.000	1.752
Pop. d'El-Tarf	D0	9.040	29.200	5.200	9.778	10.608	0.925
Pop. de Bejaïa	D0	10.224	27.200	5.200	15.278	12.680	1.203
Pop. de Sétif	D1	18.920	48.800	6.600	30.000	24.600	1.644
Pop. d'El-Tarf	D1	16.467	74.333	7.333	27.833	12.667	2.330
Pop. de Bejaïa	D1	16.400	49.000	6.750	25.500	21.750	1.767
Pop. de Sétif	D2	29.100	222.800	12.800	95.600	38.600	2.951
Pop. d'El-Tarf	D2	25.633	247.667	10.667	36.667	15.667	2.300
Pop. de Bejaïa	D2	28.750	168.250	10.750	78.500	32.250	2.838
Pop. de Sétif	D3	25.260	92.600	8.200	33.600	21.400	1.839
Pop. d'El-Tarf	D3	31.667	301.667	10.000	238.333	257.833	0.975
Pop. de Bejaïa	D3	31.060	188.800	8.400	142.200	145.400	1.575

* la dose qui a enregistré la hauteur végétative printanière et le nombre de feuilles les plus importants est la 3^{ème} dose, données par la population d'El-Tarf (31,66 cm ; 301,67 feuilles par plante). Le témoin a présenté les valeurs les plus faibles des deux paramètres pour les trois populations du sulla (entre 8,30 cm et 10,22 cm; entre 24,2 et 29,2 feuilles par plante). Ces valeurs présentent environ 30% seulement de la hauteur élevée et 8,84% du nombre élevé des feuilles. Nous remarquons ainsi que le nombre le plus faible des feuilles est porté par un nombre faible des tiges, donc les deux variables évoluent systématiquement. L'azote joue un rôle très important dans la croissance en hauteur des plantes chez toutes les familles botaniques (Poacées, Fabacées...).

RÉSULTATS ET DISCUSSION

* parmi les paramètres morphologiques des plantes les plus importants pour des considérations fourragères sont le poids frais des feuilles et tiges, qui sont, dans les cas normaux, corrélés positivement. Comme c'est connu, les valeurs les plus faibles sont enregistrées par le témoin suivi par la 1^{ère} dose (la plus faible). Notons que les valeurs les plus élevées de ces deux paramètres sont enregistrées par la population d'El-Tarf pour la 3^{ème} dose: le poids frais des feuilles est de 238,33g et le poids frais des tiges est de 257,83g. Mais la chose qui apparaît non intéressante c'est que la même population pour la même dose a enregistré le rapport feuilles/tige très faible (0,97). Cette valeur signifie que le poids des feuilles et des tiges se rapprochent beaucoup, la chose qui n'est pas intéressante pour une plante fourragère car elle devient de faible qualité et de palatabilité.

La population du Sétif de la 2^{ème} dose a enregistré la valeur la plus importante du rapport feuilles sur tiges (2,95). On note une variation de 65,10% entre la valeur la plus faible et la plus élevée de ce rapport (le rapport le plus faible est manifesté par la population d'El-Tarf à la 3^{ème} dose).

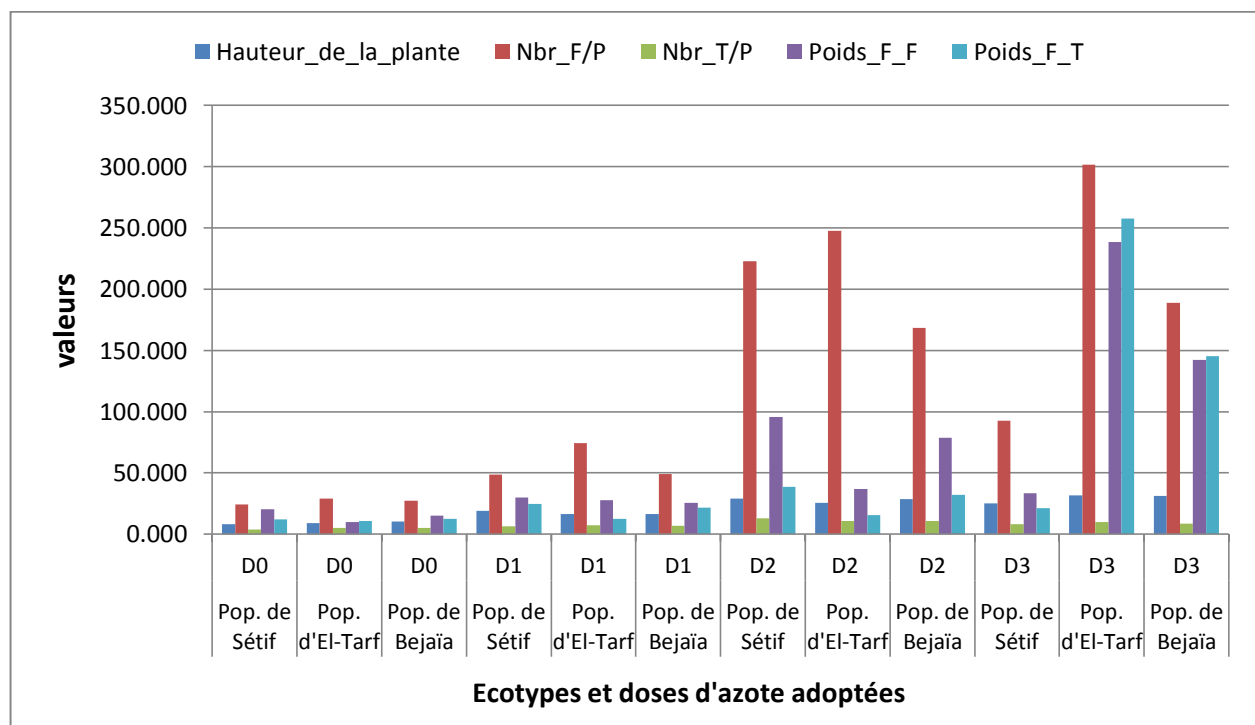


Figure 38 : Histogramme illustrant la variation des paramètres morphologiques entre les populations et les doses d'azote

D'après la Figure 38, la variation des paramètres morphologiques est présentée. Nous remarquons qu'il y a une différence qui existe entre les populations et les doses d'azote. La dose minimale (12,5u d'azote) semble insuffisante pour garantir une production végétative (les feuilles et les tiges). Alors que, les doses 2 et 3 ont manifesté des résultats importants et qui se rapprochent beaucoup. Pour la 2^{ème} dose, la population de Sétif a regroupé la majorité des valeurs intéressantes des paramètres, à

savoir : la hauteur de la plante, poids frais des feuilles et des tiges. Allant vers la 3^{ème} dose, on observe un déclin de tous les paramètres (sauf rapport feuilles/tiges). Il nous semble que c'est une dose non convenable pour l'écotype de Sétif, qui est acceptable de point de vue économique et environnemental.

❖ 2.3.1.2. Analyse statistique des paramètres morphologiques

Dans cette partie, nous allons soumettre toutes les données recueillies des différents traitements à des analyses statistiques en utilisant le logiciel libre R; à savoir la normalité, l'égalité des variances, l'ANOVA, le test post-hoc (distinction des groupes homogènes).

Test de normalité et analyse des données

Un test bilatéral au seuil de 5% a été pratiqué sur toutes les données des observations pour confirmer la normalité des données. Le test de normalité utilisé est celui de Shapiro et Wilk, pour l'ensemble des observations des paramètres mesurés. Le test de Shapiro-Wilk donne des probabilités et des *p-value* très faibles, inférieurs à 0.05 (**Tableau 24**). L'hypothèse H0 de normalité est donc rejetée.

Tableau 24 : Résultats du test de normalité pour tous les paramètres morphologiques

Paramètres	Hauteur de la plante	Nombre F/P	Nombre T/P	Poids Frais Feuilles	Poids Frais Tiges	Rapport F/T
Shapiro-Wilk test	0.9466	0.63252	0.87277	0.423	0.3147	0.90504
<i>p-value</i>	0.0378	2.252e-09	0.0001492	4.528e-12	3.353e-13	0.001365

Les données donc ne suivent pas une distribution normale. On est donc obligé d'utiliser un test non-paramétrique qui est le test de Kruskal-Wallis (1953) pour toutes les variables quantitatives en fonction des différentes doses d'engrais azoté et en fonction des écotypes cultivés.

a- Analyses statistiques en fonction du 1^{er} critère de classification "populations du sulla"

Pour le critère des populations étudiées, le calcul du test de Kruskal-Wallis de tous les paramètres nous a donné des résultats qui se ressemblent à cet exemple:

Chi-squared = 8.2901, df = 8, *p-value* = 0.4057 (spécifique à la hauteur de la plante)

La valeur du *p-value* trouvée, traduit l'inexistence d'une différence significative entre les médianes des trois populations étudiées.

b- Analyses statistiques en fonction de 2^{ème} critère de classification "doses d'azotes"

1. Hauteur des plantes :

Pour le critère des doses d'azote utilisées, le même test précédent a donné les résultats suivants :

chi-squared = 31.797, df = 3, *p-value* = 5.774e-07

La valeur du *p-value* trouvée, traduit l'existence d'une différence très hautement significative entre les médianes des quatre doses d'azote utilisées (**Figure 39**). La dose 2 a enregistré une moyenne intéressante par rapport à la dose 3.

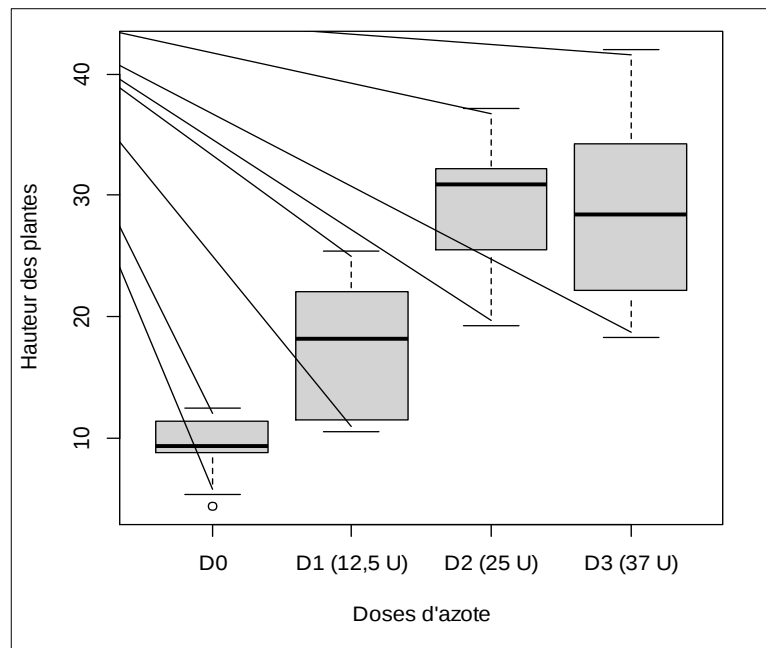


Figure 39 : Box plot de la hauteur des plantes par rapport aux doses d'azote

Dans le but de déterminer entre quelles doses réside cette différence, nous avons réalisé les tests de comparaison multiples avec la méthode d'ajustement de Bonferroni (**Tableau 25**). Ce test a révélé une différence très hautement significative entre le témoin et les doses 2 et 3 (25 et 37 u), une différence hautement significative entre le témoin et la dose 1 et entre la dose 1 et la dose 2 et 3.

Tableau 25 : Niveau de différence de la hauteur des plantes entre les doses d'azote appliquées

	D0	D1	D2	D3
D1	0.00899	-	-	-
D2	0.00051	0.00619	-	-
D3	0.00021	0.00721	1.00000	-

➔ L'analyse de la variance de la hauteur des plantes a révélé une différence hautement significative entre les écotypes, et une différence très hautement significative entre des doses d'azote utilisées.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Tableau 26 : Tableau de l'analyse de la variance de la hauteur des plantes en fonction des traitements

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr (>F)	Signi.
Ecotypes	8	960.26	120.03	3.2232	0.009164	**
Doses d'azote	3	2556.05	852.02	22.8791	6.674e-08	***
Interaction	3	90.02	30.01	0.8058	0.500597	NS
Résiduel	30	1117.20	37.24			

L'analyse de la variance (**Tableau 26**) indique un effet significatif des traitements sur la hauteur des plantes, cet effet est hautement significatif entre les écotypes étudiés ($p < 0.01$) et très hautement significatif entre les doses ($p < 0.001$).

➔ Comparaisons multiples

En statistiques élémentaires, l'effet des deux facteurs étudiés sur la hauteur des plantes a été mis en évidence ($p\text{-values} < 0,001$), on procède à l'application de test de Tukey (**Tableau 27**) en utilisant le logiciel R. Ce test a pour objectif de comparer les moyennes de la variable réponse dans les différents groupes.

Tableau 27 : Comparaisons multiples des moyennes de Tukey

Tukey multiple comparisons of means 95% family-wise confidence level factor levels have been ordered				
	diff	lower	upper	p adj
D1 – D0	7.211	0.285	14.137	0.039
D3 – D0	15.747	8.972	22.521	0.000
D2 – D0	16.989	9.884	24.093	0.000
D3 – D1	8.535	1.609	15.462	0.011
D2 – D1	9.777	2.527	17.027	0.004
D2 – D3	1.242	-5.863	8.347	0.964

La hauteur des plantes n'est en moyenne pas significativement différente pour les doses 2 et 3. Pour les autres comparaisons, elle est significativement différente pour les autres combinaisons : les doses 0 et 1, les dose 0 et 3, les doses 0 et 2, les doses 1 et 3, les doses 1 et 2.

Ces résultats confirment l'utilisation de la 2^{ème} dose comme une dose intermédiaire de 25 u d'azote mieux d'utiliser la 3^{ème} dose pour réfléchir à la santé végétale, animale et humaine d'une part, et à la protection de l'environnement de l'autre part.

2. Nombre de feuilles par plante

Pour le critère des doses d'azote utilisées, le test de Kruskal-Wallis a donné les résultats suivants :

chi-squared = 36.596, df = 3, *p-value* = 5.601e-08

La valeur du *p-value* trouvée, traduit l'existence d'une différence très hautement significative entre les médianes des quatre doses d'azote utilisées (**Figure 40**). La dose de 25 u d'N a enregistré la médiane la plus importante par rapport aux autres traitements. Notons que la 2^{ème} et la 3^{ème} dose ont enregistré des valeurs aberrantes très élevées.

Tableau 28 : Niveau de différence du nombre de feuilles par plante entre les doses d'azote appliquées

	D0	D1	D2	D3
D1	0.00361	-	-	-
D2	0.00051	0.00068	-	-
D3	0.00021	0.00031	1.00000	-

Pour déterminer entre quelles doses d'azote se réside cette différence, nous avons réalisé les tests de comparaison multiples avec la méthode d'ajustement de Bonferroni (**Tableau 28**). Ce test a révélé une différence hautement significative entre le témoin et la dose 1 (12,5 u), une différence très hautement significative entre le témoin et les doses 2 et 3 d'un côté et entre la dose 1 et les doses 2 et 3 de l'autre côté.

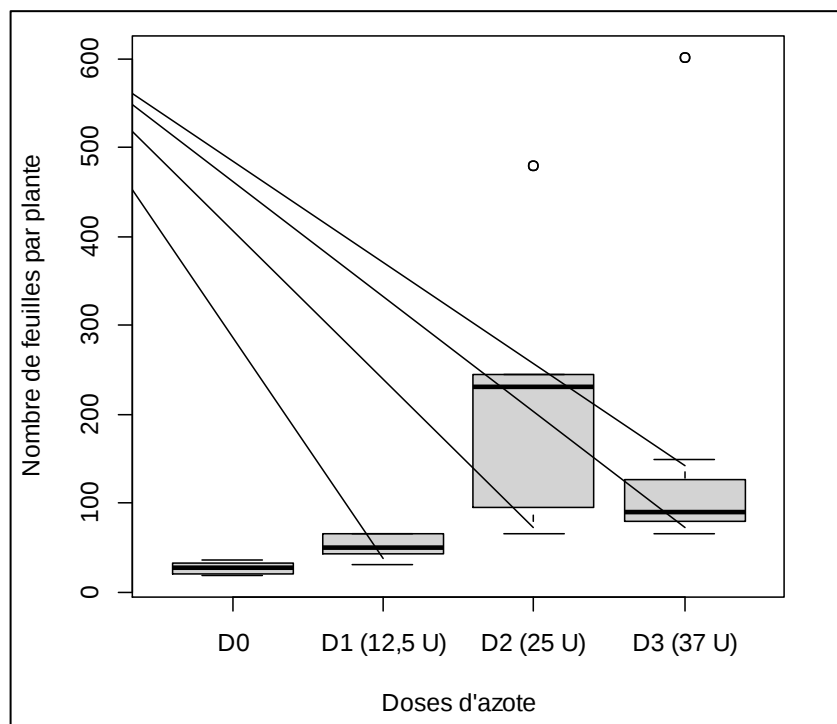


Figure 40 : Box plot du nombre des feuilles par plante en fonction des doses d'azote appliquées

RÉSULTATS ET DISCUSSION

→ L'analyse de la variance à deux facteurs de classification a été effectuée par le logiciel R. nous voulons par cette analyse de connaître l'effet et l'interaction de deux facteurs étudiés à savoir les populations du sulla utilisées (3 écotypes du sulla) et les doses d'azote appliquées (4 doses différentes) sur le paramètre étudié (nombre de feuilles par plante). Cette analyse de la variance du nombre de feuilles par plante a montré une différence hautement significative entre les écotypes et entre les doses d'azote utilisées. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant:

Tableau 29 : Tableau de l'analyse de la variance du nombre des feuilles par plante en fonction des traitements

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr (>F)	Signi.
Ecotypes	8	398418	49802	4.2755	0.001612	**
Doses d'azote	3	183012	61004	5.2372	0.005008	**
Interaction	3	28058	9353	0.8029	0.502112	NS
Résiduel	30	349448	11648			

L'analyse de la variance (**Tableau 29**) indique une différence significative des traitements sur le nombre des feuilles par plante. Cette différence est hautement significative entre les écotypes étudiés et les doses d'azote utilisées ($p < 0.01$). Les trois écotypes du sulla présentent un *p-value* de 0,0016 qui est nettement inférieur à 1%. Ainsi, les quatre doses d'azote manifestent un *p-value* de 0,005 qui est aussi inférieur à 1%. Par contre, l'interaction écotypes-doses n'a montré aucune différence sur le nombre des feuilles par plante.

→ Comparaisons multiples

Dans ce cas, l'effet des facteurs étudiés sur le nombre des feuilles par plante a été mis en évidence (*p-values* < 0,01), on procède à l'application de test de Tukey (**Tableau 30**) dans le logiciel R. Ce test a pour objectif de classer les moyennes de la variable réponse en groupes distinctes après une comparaison exacte.

Tableau 30 : Comparaisons multiples des moyennes de Tukey

Tukey multiple comparisons of means 95% family-wise confidence level factor levels have been ordered				
	diff	lower	upper	p adj
D1 – D0	20.647	-101.852	143.147	0.967
D3 – D0	95.833	-23.973	215.640	0.153
D2 – D0	150.996	25.342	276.651	0.013
D3 – D1	75.186	-47.313	197.685	0.357

D2 – D1	130.349	2.125	258.573	0.045
D2 – D3	55.162	-70.491	180.817	0.635

Le nombre de feuilles par plante est en moyenne significativement différent pour seulement les dose 0 et 2, ainsi que pour les doses 1 et 2. Alors que, il n'est pas significativement différent pour toutes les autres combinaisons.

3. Nombre de ramifications par plante

Pour le critère de classification "doses d'azote utilisées", le test de Kruskal-Wallis a donné les résultats suivants :

chi-squared = 28.059, df = 3, *p-value* = 3.53e-06

La valeur du *p-value* trouvée, traduit l'existence d'une différence très hautement significative entre les médianes des quatre doses d'azote utilisées (**Figure 41**). Toujours, la dose de 25 u d'N a enregistré la médiane la plus importante par rapport aux autres traitements.

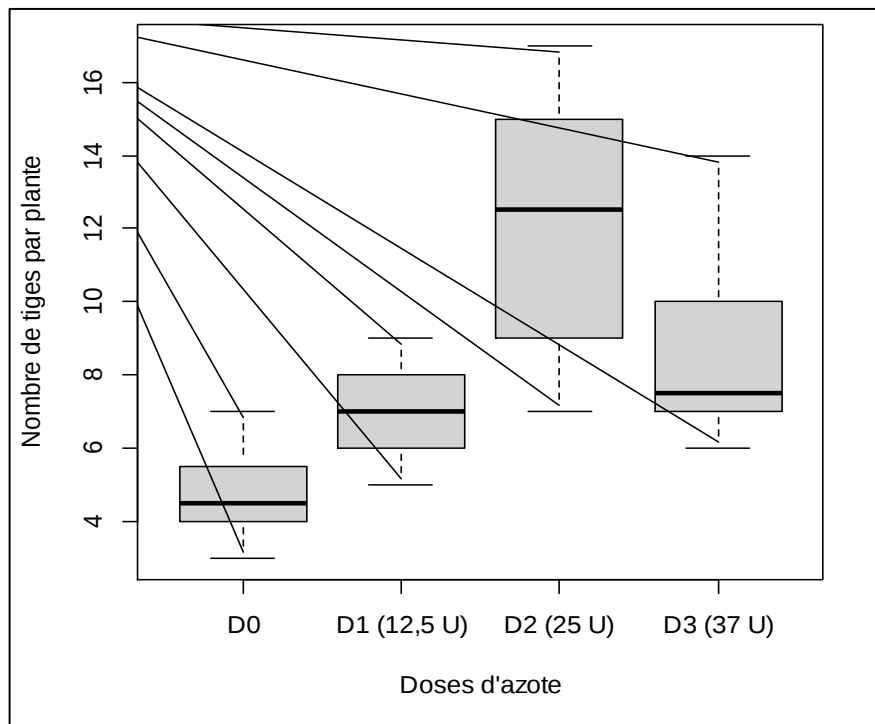


Figure 41 : Box plot du nombre de ramification par plante en fonction des doses d'azote appliquées

Pour déterminer entre quelles doses d'azote existe cette différence, nous avons réalisé les tests de comparaison multiples avec la méthode d'ajustement de Bonferroni (**Tableau 31**). Ce test a révélé une différence hautement significative entre le témoin et la dose 1 (12,5 u) et entre la dose 1 et la

RÉSULTATS ET DISCUSSION

dose 2 (25 u), une différence très hautement significative entre le témoin et les doses 2 et 3. Alors que aucune différence n'est observée entre la dose 3 et les dose 2 et 1. Nous remarquons que la dose 2 et la dose 3 sont loin d'être similaire, au contraire des paramètres précédents.

Tableau 31 : Niveau de différence du nombre de ramification par plante entre les doses d'azote appliquées

	D0	D1	D2	D3
D1	0.013	-	-	-
D2	0.000	0.010	-	-
D3	0.000	0.693	0.139	-

➔ **L'analyse de la variance** à deux critères de classification a été effectuée par le logiciel R. Nous voulons par cette analyse de connaître l'effet et l'interaction de ces deux facteurs étudiés à savoir les populations du sulla utilisées (3 écotypes du sulla) et les doses d'azote appliquées (4 doses différentes) sur le paramètre étudié (nombre de ramifications par plante). Cette analyse de la variance du nombre de tiges par plante a montré une différence très hautement significative ($p < 0.01$) entre les doses d'azote utilisées (**Tableau 32**). Alors que, aucune différence n'est observée entre les populations du sulla ni pour l'interaction ($p > 0,05$). Ces résultats nous expliquent qu'on obtient toujours des nombres très proches des ramifications par plante en cultivant l'une des populations choisies de sulla (soit celle de Sétif ou celle de Bejaïa ou d'E-Tarf). Les résultats obtenus sont présenté dans le tableau suivant:

Tableau 32 : Tableau de l'analyse de la variance du nombre de ramifications par plante en fonction des traitements

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr (>F)	Signi.
Ecotypes	8	103.361	12.920	1.8537	0.1057	NS
Doses d'azote	3	273.066	91.022	13.0591	1.245e-05	***
Interaction	3	14.384	4.795	0.6879	0.5665	NS
Résiduel	30	209.100	6.970			

➔ Comparaisons multiples

Dans ce cas, l'effet des facteurs étudiés sur le nombre des ramifications par plante a été mis en évidence ($p\text{-values} < 0,01$) pour le critère des doses d'azote appliquées, on procède à l'application de test de Tukey (**Tableau 33**) par le logiciel R. Ce test a pour objectif de classer les moyennes de la variable réponse en groupes distinctes après une comparaison exacte.

Tableau 33 : Comparaisons multiples des moyenne de Tukey

Tukey multiple comparisons of means 95% family-wise confidence level factor levels have been ordered				
	diff	lower	upper	p adj
D1 – D0	7.211	0.285	14.138	0.039
D3 – D0	15.747	8.972	22.521	0.000
D2 – D0	16.989	9.884	24.093	0.000
D3 – D1	8.535	1.609	15.462	0.111
D2 – D1	9.777	2.527	17.027	0.005
D2 – D3	1.245	-5.863	8.347	0.964

Le nombre de ramifications par plante n'est pas en moyenne significativement différent pour seulement les doses 3 et 1, ainsi que pour les doses 2 et 3. Alors que, il est en moyenne significativement différent pour toutes les autres combinaisons.

4. Poids frais des feuilles et des tiges

Nous avons appliqué le test non paramétrique de Kruskal-Wallis sur les données du poids frais des feuilles et des tiges pour le critère des doses d'azote utilisées pour déterminer si les médianes des deux groupes étudiés se diffèrent, il nous a donné les résultats suivants :

chi-squared = 22.923, df = 3, p-value = 4.19e-05 : pour le poids frais des feuilles ;

chi-squared = 17.918, df = 3, p-value = 0.0004573 : pour le poids frais des tiges ;

Les valeurs des *p-values* trouvées (<0,001) traduisent l'existence d'une différence très hautement significative entre les médianes des quatre doses d'azote utilisées (**Figure 42**). La dose de 25 u d'N a enregistré la médiane la plus importante par rapport aux autres traitements pour les deux paramètres mesurés (poids frais des feuilles ; poids frais des tiges). Notons que la 3^{ème} dose a enregistré des valeurs aberrantes très élevées. Ces résultats des deux paramètres vont avoir un effet direct sur le rapport feuilles sur tige (titre suivant).

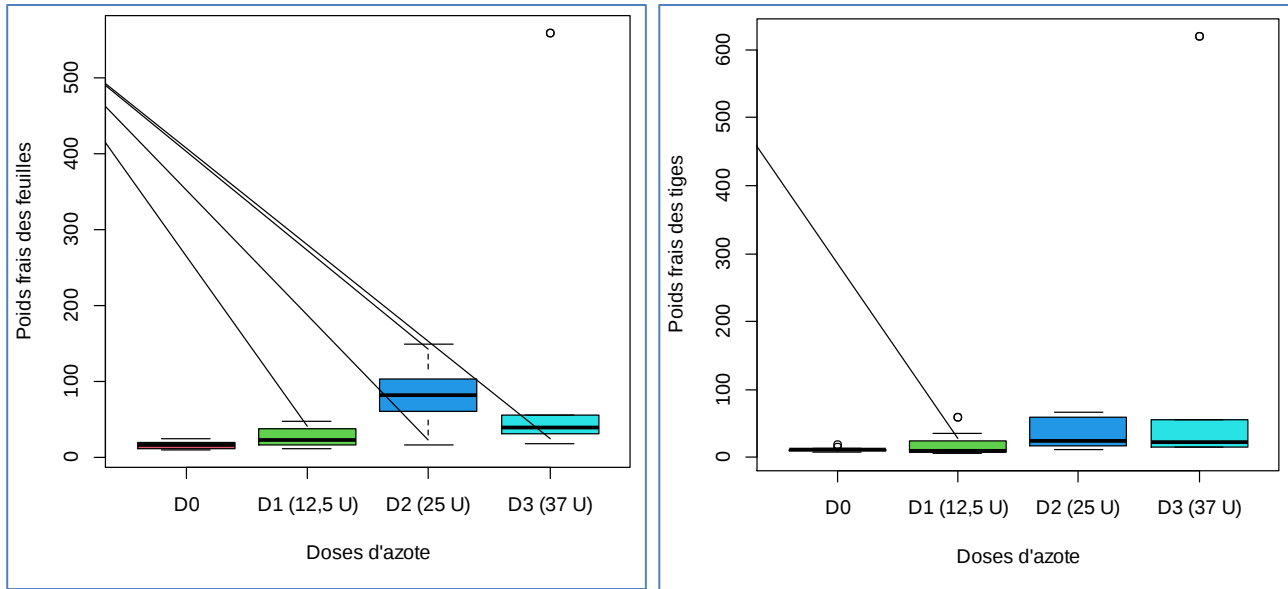


Figure 42 : Box plot du poids frais des feuilles et des tiges en fonction des doses d'azote appliquées

Dans le but de déterminer entre quelles doses d'azote se réside cette différence, nous avons réalisé les tests de comparaison multiples non paramétrique avec la méthode d'ajustement de Bonferroni (**Tableau 34**). Ce test apparié est utilisé pour comparer les données appariées qui est utilisé lorsque les données ne sont pas distribuées normalement.

- pour le poids frais des feuilles: Ce test a révélé une différence hautement significative entre le témoin et la dose 2 (12,5 u) et la dose 3 (37 u), ainsi entre la dose 1 et la dose 2. Nous remarquons qu'il n'y a pas une différence très hautement significative dans ce cas. Aussi, pas de signification entre le témoin et la dose 1, entre les doses 1 et 2 avec la dose 3.

- pour les poids frais des tiges : une différence significative dans deux cas seulement; entre le témoin et la dose 2 d'un côté et entre le témoin et la dose 3 de l'autre côté. Pour le reste des cas, ils sont tous non significatifs.

Tableau 34 : Niveau de différence des paramètres poids frais des tiges et des feuilles entre les doses d'azote appliquées

		D0	D1	D2	D3
D1	Poids / Feuilles	0.3847	-	-	-
	Poids / Tiges	1.0000	-	-	-
D2	Poids / Feuilles	0.0025	0.0078	-	-
	Poids / Tiges	0.0039	0.1871	-	-
D3	Poids / Feuilles	0.0043	0.1992	0.4149	-
	Poids / Tiges	0.0014	0.1129	1.0000	-

RÉSULTATS ET DISCUSSION

→ L'analyse de la variance à deux facteurs de classification a été effectuée par le logiciel R. nous voulons par cette analyse de connaître l'effet et l'interaction de deux facteurs étudiés à savoir les populations du sulla utilisées (3 écotypes du sulla) et les doses d'azote appliquées (4 doses différentes) sur le paramètre étudié (poids frais des feuilles et des tiges).

- l'analyse de la variance du poids frais des feuilles (**Tableau 35**) a révélé une différence hautement significative entre les doses d'azote utilisées ($0.005 < 0.01$) et significative entre les écotypes du sulla cultivé ($0.02 < 0.05$) et non significative pour l'interaction. L'analyse de la variance du poids frais des tiges (**Tableau 36**) a ainsi révélé une différence hautement significative entre les doses d'azote utilisées ($0.005 < 0.01$) et significative entre les écotypes du sulla cultivé ($0.03 < 0.05$) et non significative pour l'interaction. Les résultats obtenus pour ces deux paramètres quantitatifs mesurés sont présentés dans les deux tableaux suivants:

Tableau 35 : Tableau de l'analyse de la variance du poids frais des feuilles en fonction des traitements

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr (>F)	Signi.
Ecotypes	8	88804	29601.3	3.8826	0.01858	*
Doses d'azote	3	217316	27164.5	3.5630	0.00514	**
Interaction	3	25545	8515.0	1.1168	0.35778	NS
Résiduel	30	228724	7624.1			

Tableau 36 : Tableau de l'analyse de la variance du poids frais des tiges en fonction des traitements

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr (>F)	Signi.
Ecotypes	8	98178	32726	3.3748	0.0311	*
Doses d'azote	3	277057	34632	3.5714	0.0051	**
Interaction	3	29567	9856	1.0164	0.3992	NS
Résiduel	30	290912	9697			

→ Comparaisons multiples

La réalisation de test de Tukey (**annexes**) en utilisant le logiciel R a montré l'inexistence de l'effet des facteurs étudiés (écotypes et doses) sur le poids frais des feuilles et des tiges, toutes les *p-values* > 0,01. Donc, aucune signification a été enregistrée entre les traitements pour toutes les combinaisons, et cela pour les deux paramètres mesurés.

5. Rapport feuilles sur tiges

Le rapport feuilles/tige est un paramètre agronomique très intéressant qui nous donne une idée de proche sur la qualité fourragère et alimentaire d'une plante donnée. En analysant statistiquement ce paramètre par rapport au critère des doses d'azote utilisées, le test de Kruskal-Wallis a donné :

chi-squared = 6.3175, df = 8, *p-value* = **0.6117**.

La valeur du *p-value* trouvée, traduit l'existence d'une différence significative entre les médianes des quatre doses d'azote utilisées (**Figure 43**). Nous observons que la dose 25 u d'N a enregistré la médiane la plus importante par rapport aux autres traitements avec une valeur de 3,33 (2^{ème} dose). Alors que la valeur la plus faible est enregistrée bien évidemment par le témoin.

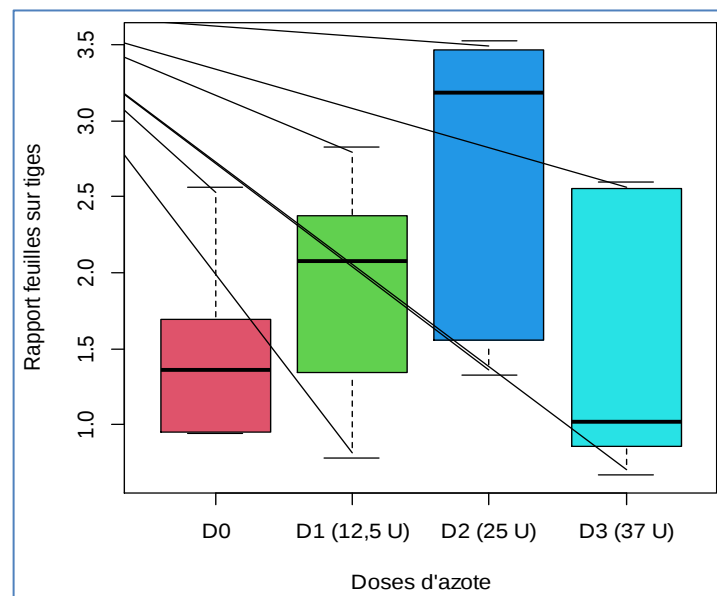


Figure 43 : Box plot spécifique au rapport des feuilles sur tiges en fonction des doses d'azote appliquées

Pour déterminer entre quelles doses d'azote se réside cette différence, nous avons réalisé les tests de comparaison multiples avec la méthode d'ajustement de Bonferroni (**Tableau 37**). Ce test a révélé une seule différence significative entre le témoin et la dose 2 (25 u). Par contre, les autres combinaisons sont toutes non significatives.

Tableau 37 : Niveau de différence du rapport feuilles sur tiges entre les doses d'azote appliquées

	D0	D1	D2	D3
D1	1.000	-	-	-
D2	0.019	0.157	-	-
D3	1.000	1.000	0.054	-

➔ Le test de Bartlett nous a fourni les résultats suivants:

Bartlett test of homogeneity of variances : Rapport_F.T by Doses_azote

Bartlett's K-squared = 3.963, df = 3, p-value = 0.2655

On remarque que le $p\text{-value} = 0.2655$ (nettement supérieur à 5%) donc on accepte le H_0 qui signifie que les variances sont homogènes.

L'analyse de la variance à deux critères de classification a été effectuée par le logiciel R. nous voulons par cette analyse de connaître l'effet et l'interaction de deux facteurs étudiés à savoir les populations du sulla utilisées (3 écotypes du sulla) et les doses d'azote appliquées (4 doses différentes) sur le paramètre étudié (rapport feuilles sur tiges). Cette analyse de la variance (**Tableau 38**) du rapport feuilles sur tiges a mentionné une différence hautement significative entre doses d'azote utilisées seulement ($p < 0,01$). Alors que les trois écotypes du sulla présentent un $p\text{-value}$ de 0,443 qui est nettement supérieur à 5% (la même chose pour l'interaction) : donc aucune différence significative n'a été observée ($p > 0.05$) pour les écotypes et l'interaction. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant:

Tableau 38 : Tableau de l'analyse de la variance du rapport feuilles sur tiges en fonction des traitements

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr (>F)	Signi.
Ecotypes	8	5.064	0.633	1.010	0.443	NS
Doses d'azote	3	11.206	3.735	6.018	0.002	**
Interaction	3	0.720	0.240	0.387	0.763	NS
Résiduel	30	18.620	0.620			

➔ Comparaisons multiples

L'effet des facteurs étudiés sur le rapport des feuilles sur les tiges a été mis en évidence ($p\text{-values} < 0,01$), donc on procède à l'application de test de Tukey (**Tableau 39**) en utilisant le logiciel libre R. Ce test a pour objectif de classer les moyennes de la variable réponse en groupes distinctes après une comparaison exacte.

Tableau 39 : Comparaisons multiples des moyennes de Tukey

Tukey multiple comparisons of means 95% family-wise confidence level factor levels have been ordered				
	diff	lower	upper	p adj
D1 – D0	0.179	-0.714	1.074	0.947
D3 – D0	0.192	-0.683	1.066	0.932
D2 – D0	1.231	0.314	2.148	0.005

D3 – D1	0.012	-0.882	0.906	0.999
D2 – D1	1.051	0.115	1.987	0.023
D2 – D3	1.039	0.122	1.956	0.021

Le rapport feuilles sur tiges est en moyenne significativement différent pour les dose 0 et 2, ainsi que pour les doses 1 et 2 et aussi pour les doses 2 et 3. Alors que, il n'est pas significativement différent pour le reste des combinaisons (D1-D0 ; D3-D0 ; D3-D1).

2.3.2. Evaluation des paramètres du rendement

❖ 2.3.2.1. Effet des doses d'azote et des populations sur les paramètres du rendement

Les premières constatations apparentes accordées aux résultats obtenus figurant dans le Tableau 40 et sur la Figure 44 montrent qu'elle existe une différence entre les écotypes étudiés d'une part et entre les doses d'azote choisies d'une autre part. Nous remarquons d'abord que les paramètres du rendement sont influencés par les doses de l'azote, où les doses 25u et 37u d'N ont enregistré les valeurs les plus élevées. De point de vue population, la population de Sétif et d'El-Tarf ont eu des résultats intéressants (**Tableau 40**). Le tableau ci-après présente les moyennes calculées de toutes les variables du rendement mesurées pour chaque écototype et chaque dose.

Pour la 2^{ème} dose d'azote, l'écotype de Sétif a occupé la première place, elle a présenté les meilleures valeurs pour toutes les variables mesurées, 158,32 t/ha de biomasse fraîche, 41,06 t/ha de biomasse sèche et 0,278 pour le taux de matière sèche, suivie par la population Bejaïa puis en fin l'écotype d'El-Tarf. La variation entre les valeurs les plus faibles et les plus élevées de biomasse fraîche et du rendement en matière sèche pour la 2^{ème} dose représente environ 60%.

Tableau 40 : Valeurs moyennes des différentes variables mesurées du rendement entre les doses et les populations

Ecotypes	Doses azote	Biomasse Fraiche	Biomasse Sèche	Rndt en MF	Rndt en MS	Taux de MS
Pop. de Sétif	D0	29.600	1.520	2.220	0.114	0.054
Pop. d'El-Tarf	D0	22.360	6.980	1.677	0.524	0.311
Pop. de Bejaïa	D0	26.800	6.820	2.010	0.512	0.251
Pop. de Sétif	D1	64.800	11.941	4.860	0.896	0.139
Pop. d'El-Tarf	D1	37.667	17.433	2.825	1.308	0.459
Pop. de Bejaïa	D1	52.500	18.067	3.938	1.355	0.335
Pop. de Sétif	D2	158.320	41.058	11.874	3.079	0.278
Pop. d'El-Tarf	D2	94.333	24.180	7.075	1.814	0.267

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Pop. de Bejaïa	D2	120.600	31.951	9.045	2.396	0.233
Pop. de Sétif	D3	77.800	22.367	5.835	1.678	0.262
Pop. d'El-Tarf	D3	133.000	47.077	9.975	3.531	0.285
Pop. de Bejaïa	D3	99.200	29.405	7.440	2.205	0.214

Alors que pour la 3^{ème} dose, la population d'El-Tarf est venue devant les deux autres populations. Ajoutons que les valeurs obtenues par la population de Sétif pour la 2^{ème} dose sont intéressantes (ne sont pas lointaines) par rapports aux valeurs fournies par la population d'El-Tarf pour la 3^{ème} dose de point de vue économique et environnemental. Sans oublier de noter que les doses témoin et D1 nous semblent insuffisantes pour assurer une production en biomasse fraîche et/ou sèches (non fiables).

La figure suivante confirme les informations détaillées dans les lignes précédentes. La meilleure valeur enregistrée pour la biomasse fraîche est obtenue par la population de Sétif pour la 2^{ème} dose d'azote (**Figure 44**) suivie par la population d'El-Tarf mais pour la 3^{ème} dose.

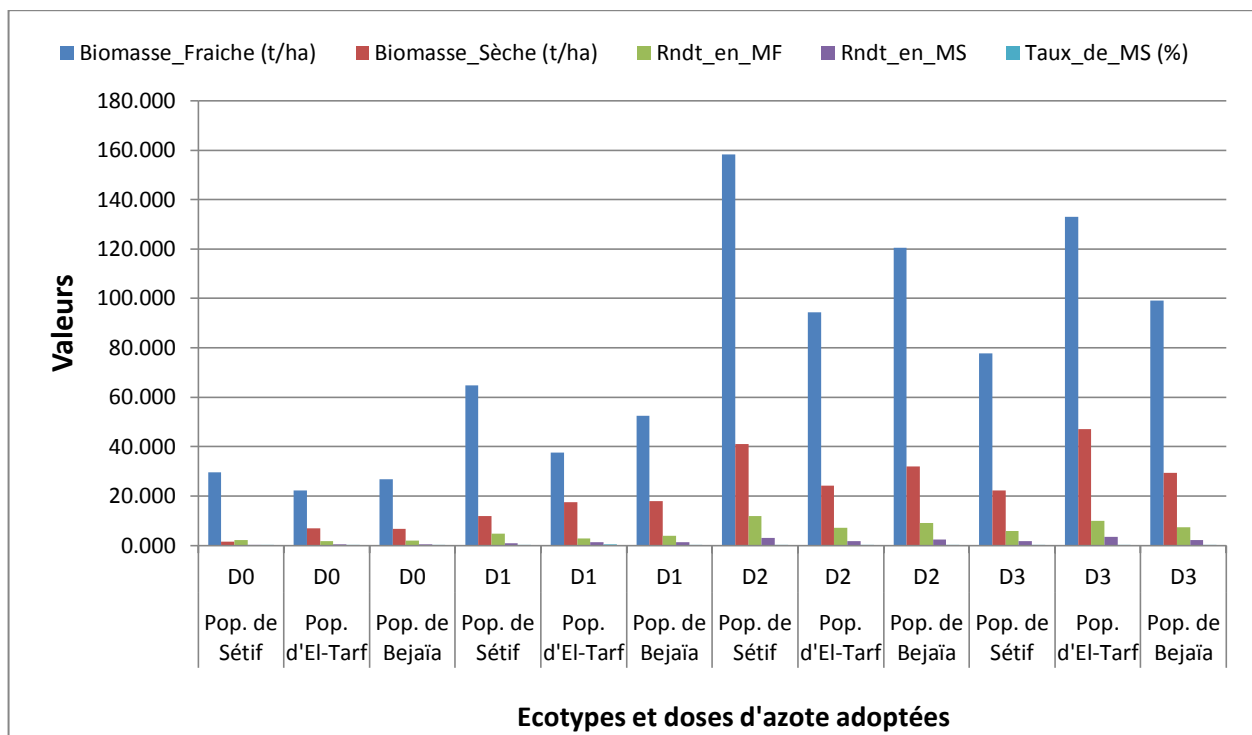


Figure 44 : Histogramme illustrant la variation des paramètres du rendement entre populations et doses d'azote

❖ 2.3.2.2. Analyse statistique des paramètres du rendement

Test de normalité et analyse des données

Toutes les données des observations des paramètres du rendement ont subi au seuil de 5% un test bilatéral pour confirmer la normalité des données. Le test de normalité utilisé est celui de Shapiro et

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Wilk, pour l'ensemble des observations des paramètres mesurés. Le test nous a donné des *p-value* très inférieurs à 5% (**Tableau 41**), cela veut dire que l'hypothèse H0 est rejeté, et H1 est accepté.

Tableau 41 : Résultats du test de normalité pour tous les paramètres du rendement

Paramètres	Biomasse fraîche	Biomasse sèche	Rendement en MF	Rendement en MS	Taux de MS
Shapiro-Wilk test	0.78958	0.73211	0.78959	0.7321	0.92501
<i>p-value</i>	1.415e-06	1.026e-07	1.415e-06	1.025e-07	0.006276

Les données donc ne suivent pas une distribution normale. On est donc obligé d'utiliser un test non-paramétrique qui est le test de Kruskal-Wallis (1953) pour toutes les variables quantitatives en fonction des différentes doses d'engrais azoté et en fonction des écotypes cultivés.

Analyses statistiques des données

D'après l'intérêt accordé à la matière sèche et sa valeur dans la qualification des plantes et des fourrages, nous avons choisi de suivre et de réaliser la suite des analyses statistiques sur les paramètres qui concernent la matière sèche (biomasse sèche, rendement en MS, taux de MS), et dans le but d'éviter les répétitions.

a- Analyses statistiques en fonction du 1^{er} critère de classification "populations du sulla"

Pour tous les paramètres mesurés, le calcul du test de Kruskal-Wallis en fonction du critère des populations étudiées nous a donné des résultats qui se ressemblent à cet exemple:

Kruskal-Wallis chi-squared = 5.0344, df = 8, *p-value* = 0.7539 (pour la biomasse sèche).

La valeur du *p-value* trouvée, traduit l'inexistence d'une différence significative entre les médianes des trois populations étudiées (*p-values* > 5%).

b- Analyses statistiques en fonction de 2^{ème} critère de classification "doses d'azotes"

1. Biomasse sèche printanière

➔ **Test de Kruskal-Wallis** : Pour le 2^{ème} critère de classification: doses d'azote utilisées, le test de Kruskal-Wallis a donné les résultats suivants :

Kruskal-Wallis chi-squared = 20.989, df = 3, *p-value* = 0.0001058

La valeur du *p-value* observé (<5%), traduit l'existence d'une différence très hautement significative entre les médianes des quatre doses d'azote utilisées (**Figure 45**). La 2^{ème} dose (25 u d'N) a enregistré

RÉSULTATS ET DISCUSSION

la médiane la plus importante par rapport aux autres traitements avec une valeur qui dépasse les 40 t/ha de MS qui est enregistré par la population de Sétif. Notons que la dose 3 a enregistré une valeur aberrante très élevée (~109 t/ha) fournie par la population d'El-Tarf (3^{ème} dose).

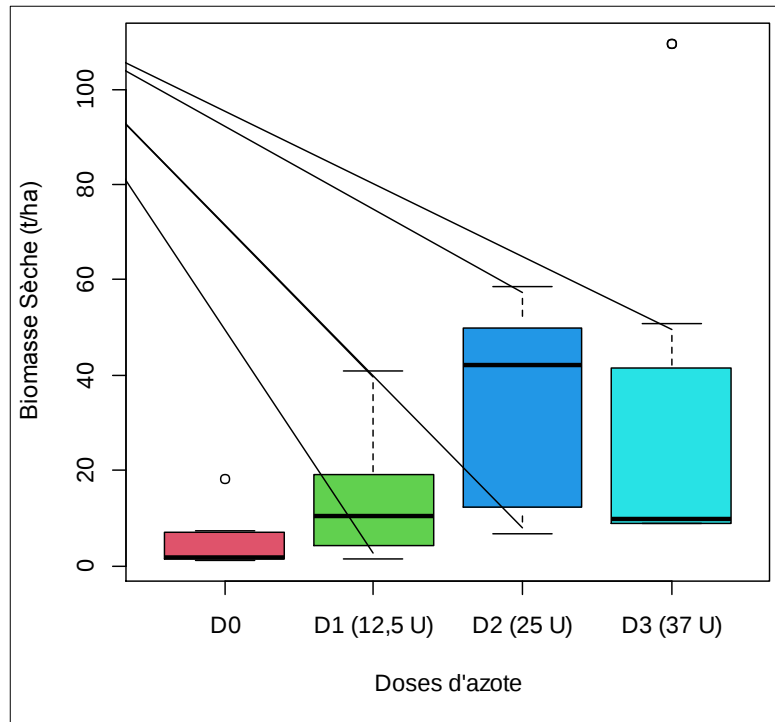


Figure 45 : Box plot présentant la biomasse sèche en fonction des doses d'azote appliquées

Pour déterminer entre quelles doses d'azote existe cette différence, nous avons réalisé les tests de comparaison multiples avec la méthode d'ajustement de Bonferroni (**Tableau 42**). Ce test a révélé une différence hautement significative entre le témoin et les doses 2 (25u) et 3 (37u) d'un côté; et significative entre la dose 1 (12,5u) et la dose 2 (25u) de l'autre côté. La différence n'est pas significative entre les autres combinaisons ($p > 5\%$).

Tableau 42 : Niveau de différence de la biomasse sèche entre les doses d'azote appliquées

	D0	D1	D2	D3
D1	0.106	-	-	-
D2	0.0025	0.0488	-	-
D3	0.0014	1.000	1.000	-

➔ Analyse de la variance

L'analyse de la variance à deux facteurs de classification a été effectué par le logiciel R. nous voulons par cette analyse de connaître l'effet de deux facteurs étudiés à savoir les populations du sulla cultivées (3 écotypes du sulla) et les doses d'azote appliquées et leur interaction sur le

RÉSULTATS ET DISCUSSION

paramètre étudié (biomasse sèche). Cette analyse de la variance de la biomasse sèche a montré une différence hautement significative entre les doses d'azote utilisées, et non significative pour les populations du sulla et l'interaction. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant:

Tableau 43 : Tableau de l'analyse de la variance de la biomasse sèche en fonction des traitements

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr (>F)	Signi.
Ecotypes	8	7027.4	878.42	1.780	0.121	NS
Doses d'azote	3	7518	2505.99	5.078	0.006	**
Interaction	3	399.6	133.22	0.269	0.846	NS
Résiduel	30	14804.9	493.50			

L'analyse de la variance (**Tableau 43**) indique une différence significative des traitements sur la biomasse sèche. Cette différence est hautement significatif entre les doses d'azote utilisées ($0.001 < p < 0.01$). Les écotypes du sulla présentent un *p-value* de 0,121 qui est nettement supérieur à 5%. Ainsi, l'interaction écotypes-doses n'a montré aucune différence sur la biomasse sèche ($p > 5\%$).

➔ Comparaisons multiples

L'effet des facteurs étudiés sur la biomasse sèche a été mis en évidence (*p-values* < 0,01), on procède à l'application de test de Tukey dans le logiciel R (**Tableau 44**). Ce test a pour objectif de classer les moyennes de la variable réponse en groupes distinctes après une comparaison exacte.

Tableau 44 : Comparaisons multiples des moyennes de Tukey

Tukey multiple comparisons of means 95% family-wise confidence level factor levels have been ordered				
	diff	lower	upper	p adj
D1 – D0	8.917	-16.297	34.131	0.772
D3 – D0	18.097	-6.563	42.757	0.212
D2 – D0	28.586	2.722	54.449	0.026
D3 – D1	9.179	-16.034	34.394	0.756
D2 – D1	19.668	-6.724	46.061	0.201
D2 – D3	10.489	-15.375	36.352	0.691

Selon le tableau, la biomasse sèche est en moyenne significativement différente pour seulement la combinaison "dose 0 - dose 2". Alors que, elle n'est pas significativement différente pour toutes les autres combinaisons.

2. Rendement en matière sèche

→ Test de Kruskal-Wallis

Pour le critère des doses d'azote utilisées, le test de Kruskal-Wallis a donné les résultats suivants :

$\chi^2 = 20.989$, $df = 3$, $p\text{-value} = 0.0001058$

La valeur du $p\text{-value}$ trouvée très faible, traduit l'existence d'une différence très hautement significative entre les médianes des quatre doses d'azote utilisées (**Figure 46**). La dose intermédiaire de 25 u d'N a enregistré la médiane la plus importante par rapport aux autres traitements (un rendement de 3,1 t/ha donné par la population de Sétif). Alors que la valeur moyenne la plus faible du rendement était de 0,11 t/ha enregistré par la même population mais avec la dose témoin. En éliminant les témoins pour les trois populations, le rendement moyen a varié de 0,9 à 3,5 t/ha de MS. Pour les trois doses d'azote utilisées, on remarque en général un accroissement de rendement de la dose 1 vers la dose 2; et un décroissement en rendement allant de 2^{ème} dose à la 3^{ème}. Notons que la 3^{ème} dose et le témoin ont enregistré des valeurs aberrantes très élevées.

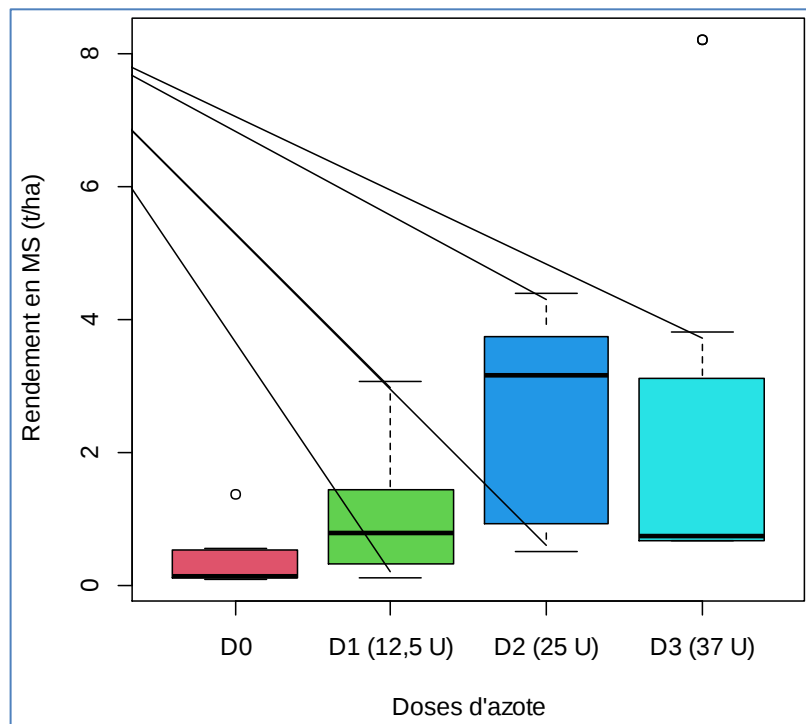


Figure 46 : Box plot du rendement en matière sèche par hectare en fonction des doses d'azote appliquées

Pour déterminer entre quelles doses d'azote se réside cette différence, nous avons réalisé les tests de comparaison multiples avec la méthode d'ajustement de Bonferroni (**Tableau 45**). Ce test a révélé une différence significative entre la dose 2 (25 u) et la dose 1 (12,5 u), une différence hautement significative entre le témoin et les doses 2 et 3.

Tableau 45 : Niveau de différence du rendement en MS (t/ha) entre les doses d'azote appliquées

	D0	D1	D2	D3
D1	0.1057	-	-	-
D2	0.0025	0.049	-	-
D3	0.0014	1.000	1.000	-

➔ Analyse de la variance

L'analyse de la variance à deux facteurs de classification a été effectuée par le logiciel R. Nous voulons par cette analyse de connaître l'effet et l'interaction des deux facteurs étudiés à savoir les populations du sulla cultivées (3 écotypes) et les doses d'azote appliquées (4 doses différentes) sur le paramètre étudié (rendement en matière sèche). Cette analyse de la variance du rendement en MS a montré une différence hautement significative entre les doses d'azote seulement. Les résultats obtenus sont détaillés dans le tableau suivant:

Tableau 46 : Tableau de l'analyse de la variance du rendement en MS (t/ha) en fonction des traitements

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr (>F)	Signi.
Ecotypes	8	39.527	4.9409	1.7799	0.121	NS
Doses d'azote	3	42.287	14.096	5.078	0.006	**
Interaction	3	2.247	0.749	0.269	0.847	NS
Résiduel	30	83.277	2.776			

L'analyse de la variance (**Tableau 46**) indique une différence hautement significative sur le rendement en matière sèche (t/ha). Cette différence est hautement significatif entre les doses d'azote utilisées ($p < 0.01$) seulement. Les trois écotypes du sulla et l'interaction entre les deux facteurs présentent des *p-values* de 0,121 et 0,847 qui sont nettement supérieurs à 5%. Cela veut dire que les écotypes et l'interaction écotypes-doses n'ont montré aucune différence significative sur le rendement en MS.

➔ Comparaisons multiples

Comme cité précédemment, l'effet du facteur étudié "doses d'azote" sur le rendement en MS des plantes a été mis en évidence (*p-values* < 0,01), on procède maintenant à l'application de test de Tukey par le logiciel R (**Tableau 47**). Ce test a pour objectif de classer les moyennes de la variable réponse en groupes distinctes après une comparaison exacte.

Tableau 47 : Comparaisons multiples des moyennes de Tukey

Tukey multiple comparisons of means 95% family-wise confidence level factor levels have been ordered				
	diff	lower	upper	p adj
D1 – D0	0.669	-1.222	2.5600	0.772
D3 – D0	1.357	-0.492	3.207	0.212
D2 – D0	2.144	0.204	4.084	0.026
D3 – D1	0.688	-1.202	2.5800	0.756
D2 – D1	1.475	-0.504	3.454	0.201
D2 – D3	0.786	-1.153	2.726	0.691

Le rendement en matière sèche par hectare est en moyenne significativement différent pour seulement la combinaison "dose 0 et dose 2". Alors que, il n'est pas significativement différent pour toutes les autres combinaisons. En comparant ce tableau avec celui du paramètre "biomasse sèche" on constate que toutes les valeurs de *p-adj* sont similaires, la chose qui confirme l'existence d'une relation étroite avec les deux paramètres (corrélation positive).

3. Taux de matière sèche à la fauche au printemps

Le taux de matière sèche est un paramètre très intéressant qui explique la production fourragère et la qualité nutritive d'une plante donnée, ainsi est un critère de sélection génétique entre les génotypes qui définit le mode de conservation de fourrage (ensilage, ...), où un taux de MS faible gêne la bonne conservation de l'herbe. Selon Ben Jeddi (2005), ce paramètre est fortement influencé par les conditions pédo-climatiques et la fertilisation.

En analysant statiquement ce paramètre par rapport aux critères des écotypes et des doses d'azote utilisées, le test de Kruskal-Wallis a donné les résultats suivants :

chi-squared = 8.2373, df = 8, *p-value* = 0.4106 ; pour les écotypes

chi-squared = 4.2327, df = 3, *p-value* = 0.2374 ; pour les doses d'azote

La valeur du *p-value* trouvée, traduit l'existence d'une différence très hautement significative entre les médianes des quatre doses d'azote utilisées (**Figure 47**).

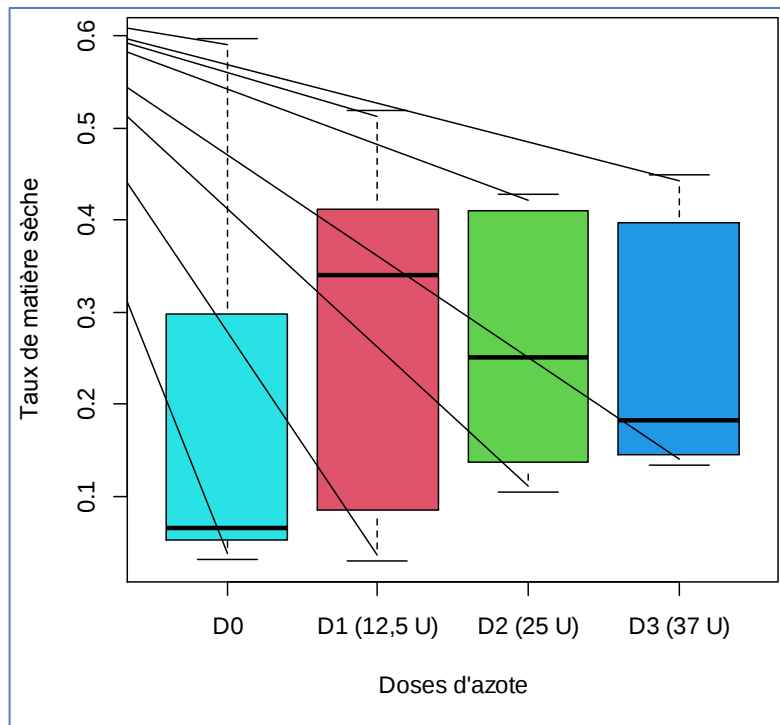


Figure 47 : Box plot du taux de matière sèche en fonction des doses d'azote appliquées

Le test de Tukey en utilisant le logiciel R, a montré l'inexistence de l'effet des facteurs étudiés (écotypes et doses) sur le taux de matière sèche. Toutes les p -values $> 0,01$. Donc, aucune signification n'a été enregistrée entre les traitements pour toutes les combinaisons pour ce paramètre mesuré.

2.3.3. Evaluation des paramètres de reproduction

❖ 2.3.3.1. Effet des doses d'azote et des populations sur les paramètres de reproduction

L'évaluation de la reproduction et des caractères de la production semencière nous conduit à évaluer un certain nombre de paramètres, nous avons choisi pour cette évaluation deux paramètres importants à titre d'exemple. Les premières simples observations des valeurs obtenues et qui s'affichent dans le Tableau 48 et sur la **Figure 48**, précisent l'existence d'une différence entre les populations étudiées d'une part et entre les doses d'azote adoptées d'une autre part. Nous remarquons d'abord les paramètres de reproduction sont influencés par les doses de l'azote choisies, où les doses 25u et 37u d'N ont enregistré les valeurs élevées. Notons cette fois-ci que même la dose 12,5 a donné des valeurs intéressantes. La chose qui peut être expliquée par la dépense de la plante de son énergie pour bien produire des semences (au détriment des organes végétatifs) pour assurer son existence dans le temps et dans l'espace. De point de vue population, la population de Sétif a réussi

de produire mieux que les autres (**Tableau 48**). Ce tableau présente les moyennes calculées de tous les paramètres mesurés pour chaque écotype et chaque dose.

Tableau 48 : Valeurs moyennes des différents paramètres mesurés de la reproduction entre doses et populations

Ecotypes	Doses azote	Nombre de gousses par plante	Nombre d'articles par gousse
Pop. de Sétif	D0	95.00	3.80
Pop. d'El-Tarf	D0	83.20	4.20
Pop. de Bejaïa	D0	114.40	4.20
Pop. de Sétif	D1	165.00	5.40
Pop. d'El-Tarf	D1	117.33	7.40
Pop. de Bejaïa	D1	148.50	6.80
Pop. de Sétif	D2	320.00	8.00
Pop. d'El-Tarf	D2	170.67	8.20
Pop. de Bejaïa	D2	236.50	7.80
Pop. de Sétif	D3	205.00	6.60
Pop. d'El-Tarf	D3	160.00	7.20
Pop. de Bejaïa	D3	184.80	6.80

Entre la dose 2 et la dose 3 les trois populations ont enregistré les valeurs les plus importantes du nombre de gousses par plante (population de Sétif / D2 : 320 g/p ; population de Bejaïa / D2 : 236,5 g/p ; population d'El-Tarf / D3 : 205 g/p). Ce paramètre du nombre de gousses par plante suit systématiquement le nombre d'inflorescences par plante et le nombre de fleurs par inflorescence; mais au cours du cycle de la plante, nous avons observé une chute trop élevée des fleurs par terre à cause de plusieurs causes. Le nombre moyen de gousses par plante varie de 160 gousses par plante à 320 gousses par plante entre la 2^{ème} et la 3^{ème} dose, ce qui représente un pourcentage de variation de 50%. Dans ce cas, le témoin a montré une valeur intéressante (114,4 g/p), elle représente un pourcentage de 35,75% de la valeur la plus élevée (320 g/p).

Le nombre moyen d'articles par gousse est un paramètre génétique et spécifique, il est influencé par la nutrition minérale de la plante. A cet effet, nous avons observé la production des gousses et des articles même chez le traitement 0. Ce nombre est moyennement similaire entre les différents traitements (**Figure 48**). Il varie entre 3,8 articles par plante (population de Sétif / D0) et 8,2 articles par gousse (population d'El-Tarf / D2).

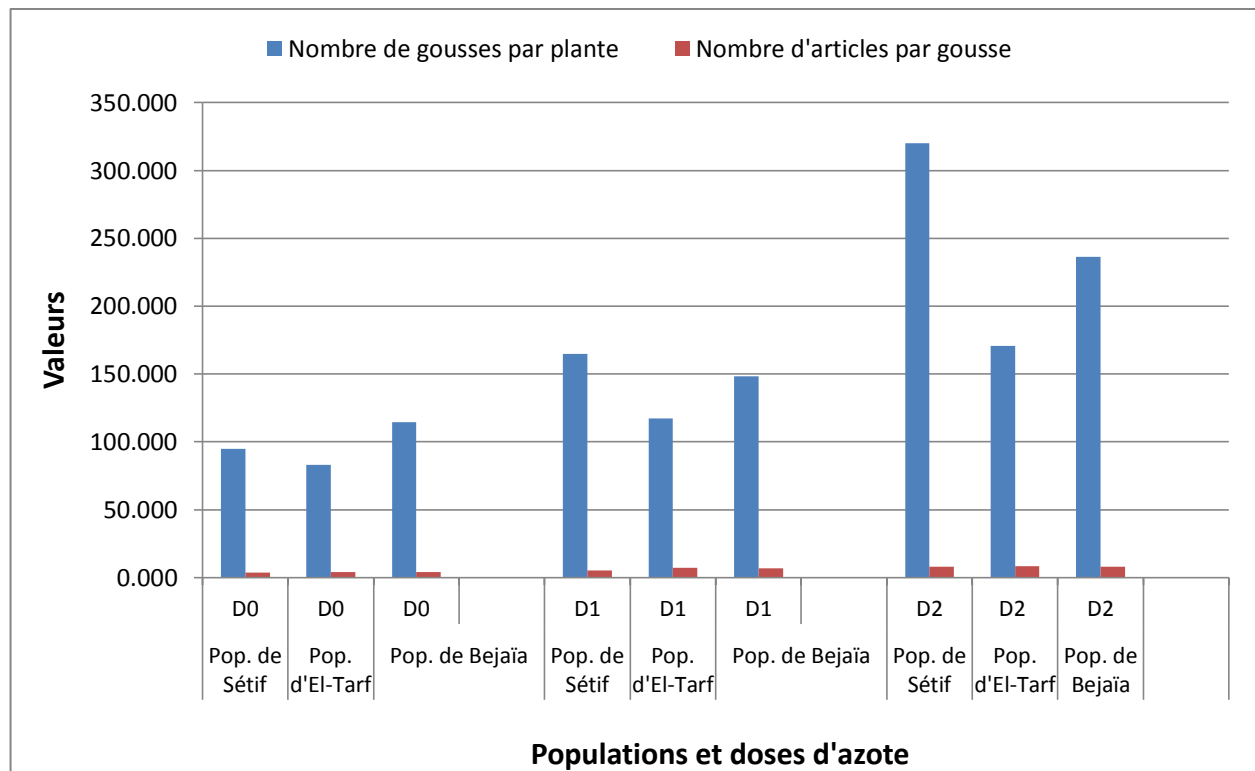


Figure 48 : Histogramme illustrant la variation des paramètres de la reproduction entre les populations et les doses d'azote

En utilisant l'échelle logarithmique sur Excel, les résultats seront bien clairs (Figure 49)

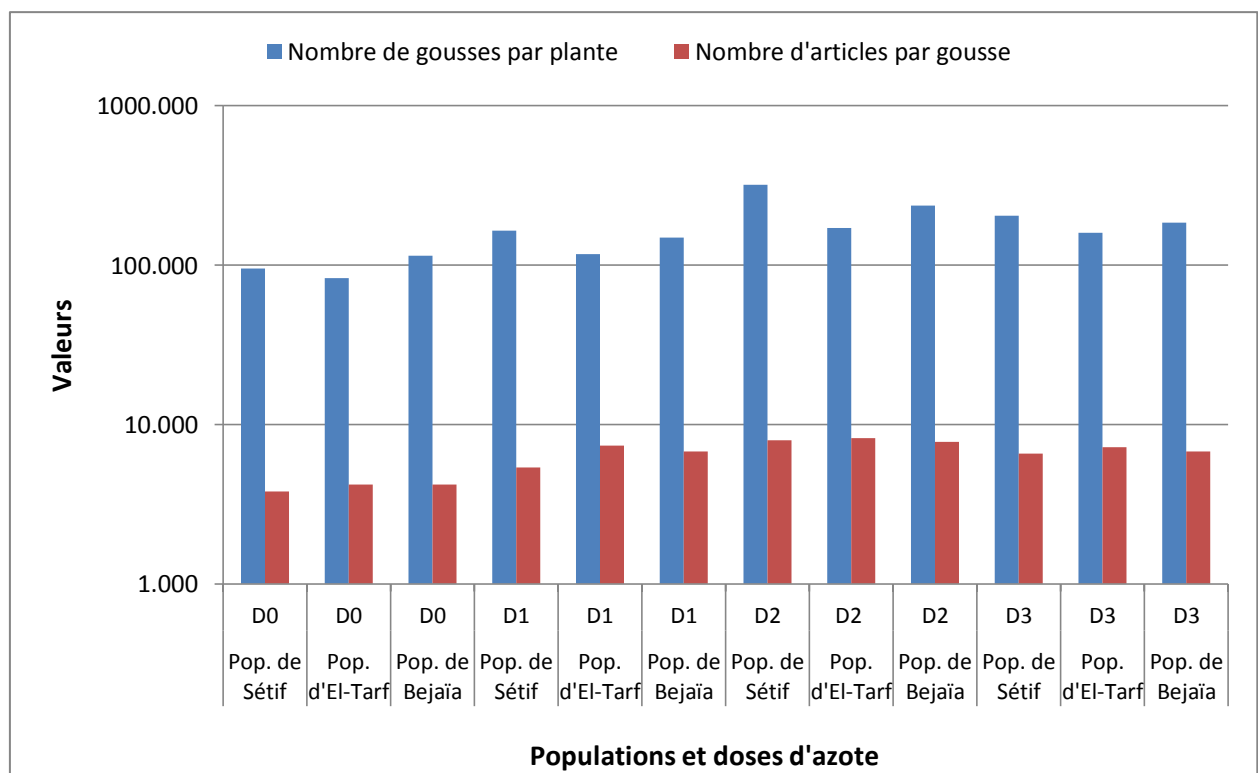


Figure 49 : Histogramme illustrant la variation des paramètres de la reproduction entre les populations et les doses d'azote en utilisant l'échelle logarithmique

❖ 2.3.3.2. Analyse statistique des paramètres de la reproduction et de production des graines

Test de normalité et analyse des données

Le test de normalité utilisé est celui de Shapiro et Wilk. C'est un test bilatéral au seuil de 5% qui est pratiqué sur toutes les données des observations pour vérifier la distribution normale (ou non) des données collectées, pour l'ensemble des observations des paramètres mesurés. Le présent test nous a donné des probabilités et des *p-value* différents, inférieurs à 5% pour le paramètre "nombre de gousses par plante" et supérieur à 5% pour le paramètre "nombre d'articles par gousse" (**Tableau 49**). A partir de ces résultats on confirme l'hypothèse H0 et/ou l'hypothèse H1.

Tableau 49 : Résultats du test de normalité pour tous les paramètres de reproduction

Paramètres	Nombre de gousses par plante	Nombre d'articles par gousse
Shapiro-Wilk test	0.87034	0.95921
<i>p-value</i>	0.0001277	0.08237

Les données du 1^{er} paramètre ne suivent pas une distribution normale. On est donc obligé d'utiliser un test non-paramétrique qui est le test de Kruskal-Wallis (1953) pour toutes les variables quantitatives en fonction des différentes doses d'engrais azoté et en fonction des écotypes cultivés. Alors que les données de 2^{ème} paramètre ont une distribution normale, donc on cherche par la suite de vérifier l'hypothèse de l'homogénéité des variances (homoscédasticité) par le test de Bartlett.

Analyses statistiques des données

a- Analyses statistiques du paramètre "nombre de gousses par plante"

a-1. En fonction du 1^{er} critère de classification "populations du sulla"

Pour le paramètre mesuré "nombre de gousses par plante", le test de Shapiro a été largement inférieur à 5%, donc on continue au calcul du test de Kruskal-Wallis en fonction du critère des populations étudiées qui nous a donné les résultats suivants:

Kruskal-Wallis chi-squared = 8.4684, df = 8, *p-value* = 0.3891 ;

La valeur du *p-value* trouvée, traduit l'inexistence d'une différence significative entre les médianes des trois populations étudiées (*p-values* > 5%).

a-2. En fonction de 2^{ème} critère de classification "doses d'azotes"

Pour le paramètre mesuré "nombre de gousses par plante", le calcul du test de Kruskal-Wallis en fonction du critère des doses d'azote appliquées nous a donné les résultats suivants:

Kruskal-Wallis chi-squared = 28.566, df = 3, *p-value* = 2.763e-06

La valeur du *p-value* trouvée, prouve l'existence d'une différence significative entre les médianes des quatre doses d'azote appliquées (*p-values* < 5%) (**Figure 50**). La 2^{ème} dose de 25 u d'N a enregistré la médiane la plus importante par rapport aux autres traitements avec 242,4 gousses par plante, suivie par la 3^{ème} dose et en fin par la 1^{ère} dose (183,3 et 143,6 gousses par plante respectivement). La valeur la plus faible représente un pourcentage de différence de 68,8% de la valeur la plus élevée, et la valeur intermédiaire représente à son tour un pourcentage de différence de 59,1% de la valeur la plus élevée.

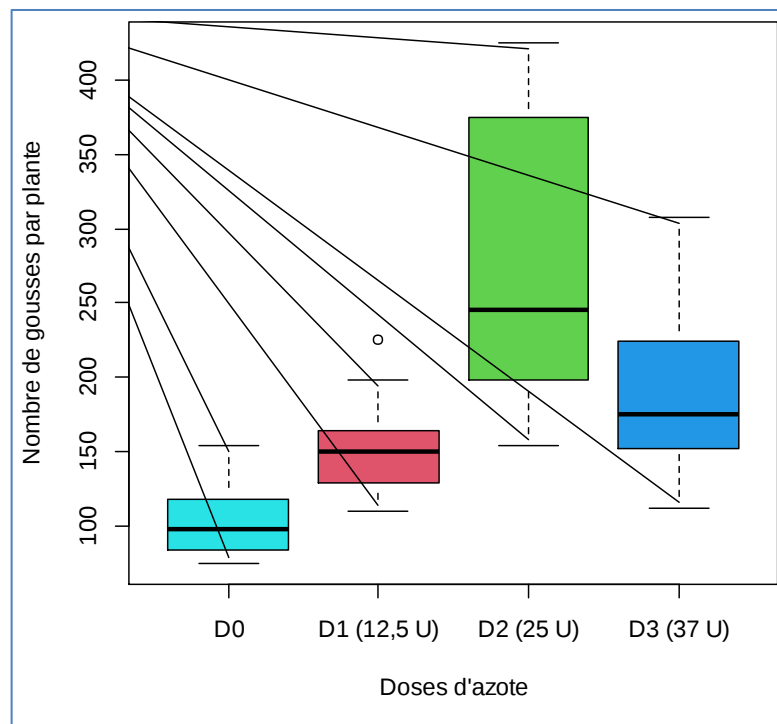


Figure 50 : Box plot du nombre de gousses par plante en fonction des doses d'azote appliquées

A titre individuel et indicatif des populations, on remarque que la population de Sétif a enregistré un accroissement du nombre de gousses par plante de 93,93% de la dose 2 à la dose 3, puis un recul de 35,94% de la dose 2 à la dose 3. La même constatation a été enregistrée pour les deux autres populations. La chose qui veut dire que la 2^{ème} dose d'N de 25 u est la meilleure pour ces écotypes.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Pour la 2^{ème} dose, signalons que la population de Sétif a donné la valeur la plus élevée entre les autres populations. Ajoutons que, la 1^{ère} dose a enregistré une valeur aberrante élevée.

Pour déterminer entre quelles doses d'azote se réside cette différence, nous avons réalisé les tests de comparaison multiples avec la méthode d'ajustement de Bonferroni (**Tableau 50**). Ce test a révélé une différence très hautement significative entre le témoin et la dose 2 (25 u), aussi une différence hautement significative ($p < 0.01$) entre les trois combinaisons suivantes : témoin et dose 1 ; témoin et dose 3 ; la dose 1 et la dose 2.

Tableau 50 : Niveau de différence du nombre de gousses par plante entre les doses d'azote appliquées

	D0	D1	D2	D3
D1	0.00896	-	-	-
D2	0.00059	0.00706	-	-
D3	0.00102	0.41164	0.20730	-

b- Analyses statistiques du paramètre "nombre d'articles par gousse"

b-1. Test de normalité

Nous avons calculé le test de normalité de Shapiro-Wilk, pour l'ensemble des observations du nombre d'articles par gousse, qui nous a donné un *p-value* supérieur à 5%, qui est de l'ordre de 0,082. Les données donc suivent la loi normale.

b-2. Test d'homogénéité des variances

L'hypothèse "nulle" signifie que toutes les variances des populations sont égales, l'hypothèse alternative c'est qu'au moins deux d'entre elles diffèrent. Par conséquent, les *p-value* sont inférieures à 5% suggèrent que les variances sont significativement différentes et que l'hypothèse d'homogénéité des variances a été confirmé. Nous avons utilisé pour cette vérification, le test de Bartlett et les résultats obtenus sont les suivants:

Bartlett test of homogeneity of variances
data: Nbr_Art.Gs by Doses_azote
Bartlett's K-squared = 5.2871, df = 3, p-value = 0.1519

D'après les résultats illustrés, le *p-value* (0,152) est supérieur au niveau de significativité qui est de 5%. Cela signifie que les variances du paramètre nombre d'articles par gousse soient statistiquement homogènes pour les trois groupes de traitements.

b-3. Analyse de la variance

L'analyse de la variance à deux critères de classification, populations du sulla et doses d'azote, a été faite dans le but de comparer les trois populations du sulla cultivées et les quatre doses d'azote utilisées. Cette analyse montre une différence très hautement significative entre les doses d'azote pour le nombre d'articles par gousse, et pas de signification entre les écotypes (**Tableau 51**).

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant:

Tableau 51 : Tableau de l'analyse de la variance du nombre d'articles par gousse en fonction des traitements

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr (>F)	Signi.
Ecotypes	8	13.965	1.270	0.8060	0.6337	NS
Doses d'azote	3	99.040	33.013	20.961	1.069e-07	***
Interaction	3	3.475	1.158	0.7354	0.5386	NS
Résiduel	30	50.400	1.575			

Le paramètre "doses d'azote appliquées" présente un *p-value* largement inférieur à 1%, cela confirme une différence très hautement significative entre les traitements. Alors que pour le critère "écotypes" n'a révélé aucune différence significative entre les populations cultivées ($p > 5\%$), cela veut dire que le nombre d'articles par gousse n'a pas beaucoup varié entre les populations du sulla.

Ce qui peut être expliqué par le fait que les doses croissantes en azotes à un certaines limites ont significativement influencé le nombre d'articles par gousse, mais quelle est la dose qui a influencé positivement? Le test suivant le confirme.

b-4. Comparaisons multiples

D'après l'analyse précédente, l'effet des facteurs étudiés sur le nombre d'articles par gousse a été clairement mis en évidence ($p\text{-values} < 0,000$), on procède à l'application de test de Tukey en utilisant le logiciel R (**Tableau 52**). Ce test a pour objectif de classer les moyennes de la variable réponse en groupes distinctes après une comparaison exacte.

Tableau 52 : Comparaisons multiples des moyennes de Tukey

Tukey multiple comparisons of means 95 % family-wise confidence level factor levels have been ordered				
	diff	lower	upper	p adj
D1 – D0	1.755	0.394	3.116	0.007

RÉSULTATS ET DISCUSSION

D3 – D0	2.216	0.855	3.578	0.000
D2 – D0	3.250	1.862	4.638	0.000
D3 – D1	0.461	-0.872	1.795	0.785
D2 – D1	1.495	0.134	2.856	0.027
D2 – D3	1.034	-0.327	2.395	0.189

Le test Tukey, réalisant des multiples comparaisons des moyennes (95% family-wise confidence level), a montré une différence très hautement significative avec $Pr(>F)$: entre les quatre doses d'azote et les trois populations du sulla cultivées. Nous remarquons, pour le paramètre de nombre d'articles par gousse, une différence significative ($p=0,027 < 0,05$) entre la 1^{ère} dose et la 2^{ème} dose, une différence hautement significative ($p=0,007 < 0,01$) entre le témoin et la 1^{ère} dose, une différence très hautement significative ($p<0,001$) entre deux combinaison (D0 et D3 ; D0 et 2). Ainsi, pas de différence significative entre deux combinaisons (D1 et D3 ; D2 et D3).

Le nombre d'articles par gousse est en moyenne significativement différent pour les doses appliquées, la chose qui veut dire que les doses ont des effets différents sur la production des articles chez les plantes cultivées.

Corrélation entre les deux paramètres de reproduction

La corrélation est un paramètre statistique qui a pour objectif de donner une idée sur la relation linéaire et simple qui peut exister à l'intérieur des données entre deux variables quantitatives différentes. Elle n'a aucune relation avec la cause et l'effet. Si les variables étudiées ont une distribution normale, on exécute la corrélation de Pearson, si ce n'est pas le cas on opte à la corrélation de Spearman.

La corrélation est expliquée par deux valeurs sans unités: **coefficient de variation** (noté: r) compris entre +1 et -1 ; et **significativité statistique** (noté: p).

Spearman's rank correlation rho
data: Nbr_Gs.Plant and Nbr_Art.Gs
S = 9029.6, $p\text{-value} = 1.257\text{e-}06$
alternative hypothesis: true rho is not equal to 0
sample estimates:
0.6145463

D'après les résultats illustrés et encadrés, on remarque l'existence d'une corrélation assez forte et positive entre le nombre de gousse par plante et le nombre d'articles par gousse ($r=0,61$). Cela veut dire que plus que le nombre de gousses par plante augmentent, plus que le nombre d'articles par

gousse augmentent. Notons que le nombre d'articles par gousse est limité par des limites génétiques, mais il est influencé par l'alimentation hydrique et minérale.

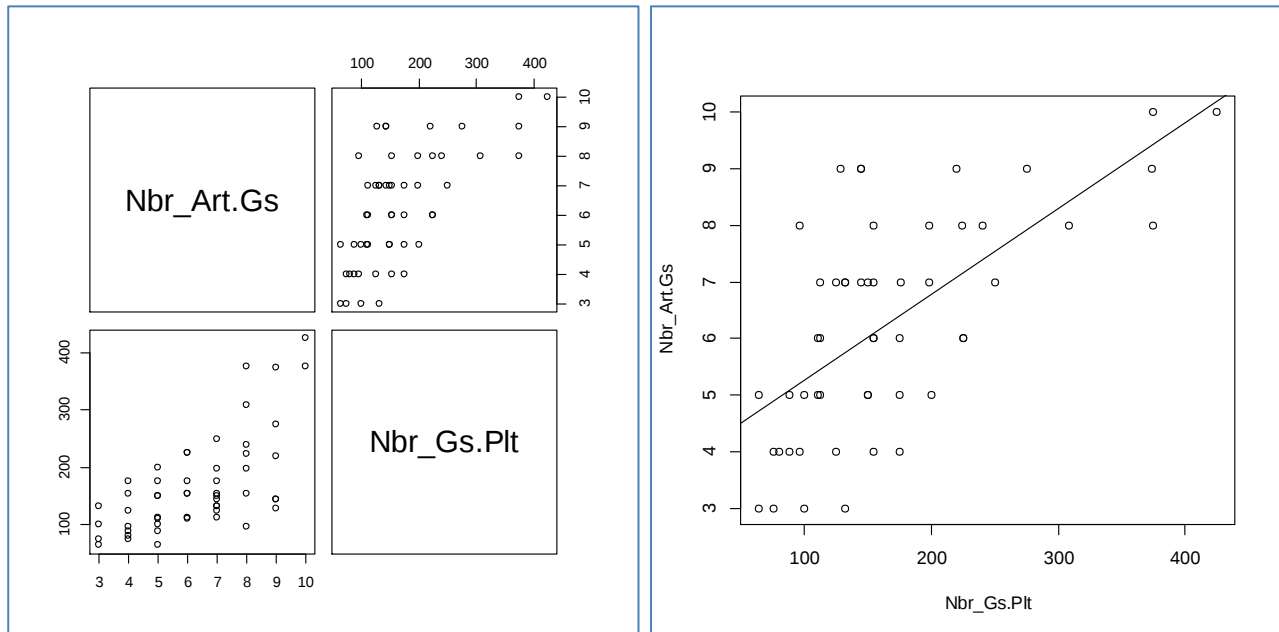


Figure 51 : Corrélation multiple entre les paramètres de la reproduction

Matrice de corrélation (Corrélation entre tous les paramètres confondus)

La matrice de corrélation a été réalisée avec tous les variables quantitatives mesurées dans cette analyse. Nous avons utilisé le logiciel R.

Les principales observations sont les suivantes (Figure 52 et Figure 53):

- la corrélation positive la plus forte est remarquée entre les paramètres agronomiques suivants: (nombre de feuilles – biomasse fraîche avec un coefficient de corrélation $r=0,90$) ; (nombre de feuilles – rendement en matière fraîche : $r=0,90$) ; (nombre de tiges par plante – nombre de gousses par plantes: $r=0,93$) ; (poids frais de feuilles – poids frais des tiges : $r=0,98$). Ces relations fortes entre ces paramètres nous semblent systématiques, et elles sont très intéressantes de point de vue agronomique. A titre d'exemple, plus que le nombre de feuilles augment plus que la biomasse fraîche augment, le caractère qui donne une idée sur la qualité fourragère.
- la corrélation positive la plus faible est donnée par les paramètres agronomiques suivants : (la hauteur de la plante – le rapport feuilles/tiges avec un coefficient de corrélation $r=0,16$) ; (biomasse fraîche – taux de matière sèche : $r=0,21$) ; (nombre de tiges par plante – taux de matière sèche : $r=0,34$).

- la corrélation négative la plus faible est trouvée entre les paramètres agronomiques suivants, (poids frais des tiges – rapport feuilles/tiges : $r = - 0,24$) qui est logique, plus que le poids des tiges augmente plus le rapport diminue (parce que c'est une division).

La majorité des paramètres de mesure du même groupe sont liés entre eux, chacun peut influencer soit positivement ou négativement sur l'autre. Les paramètres foliaires influent les-uns les autres, par exemple le nombre de feuilles par plante ou le poids des feuilles a certainement un effet sur la biomasse fraîche ou le rapport feuilles sur tiges; ainsi, les paramètres du rendement, la biomasse fraîche et/ou sèche a une influence sur le rendement... A leur tour, les paramètres de reproduction (fleurs et graines) ont la même chose, le nombre de gousses par plante est influencé par le nombre d'inflorescences par plante... Cependant, d'après les résultats du tableau de la matrice (annexes), aucune corrélation n'est signalé entre le rapport feuilles/tiges et le nombre de feuilles par plante. Malgré que le nombre influe certainement et positivement sur le poids.

Dans le même contexte, il existe des relations entre les paramètres des groupes différents, par exemple, le nombre de gousses ou d'articles par plante est influencé par la surface foliaire (le nombre des feuilles) car ces dernières sont le siège de la synthèse des produits organiques par la photosynthèse qui vont s'emmagasiner au niveau des organes de stockage (graines); et plus que la surface foliaire sera élevée plus que l'activité photosynthétique et par la suite la production des fruits et des graines va être élevée. D'après Kondra *et al.*, (1983), la production de semences est largement corrélée avec la date de semis. Ceci est pratiquement juste sur le terrain, nous avons remarqué que si on cultive le sula tardivement, les plantes vont nous donner une petite quantité de semences à la fin du cycle végétatif qui est lui-même sera très court (la sénescence commence vers la fin de mois de mai - début de juin quoi que ce soit la date de semis).

En terme de l'enrichissement du sol par l'azote minéral par les fabacées, en cas de la formation des nodules au niveau des racines, une corrélation positive existe entre la production du vert et les quantités d'azote exportées dans le sol. Ces quantités d'azote vont permettre par la suite de choisir la culture qui vient après cette fabacée et de raisonner la quantité d'azote qu'on doit ajouter au sol l'année prochaine (on doit connaître exactement les quantités laissées dans le sol).

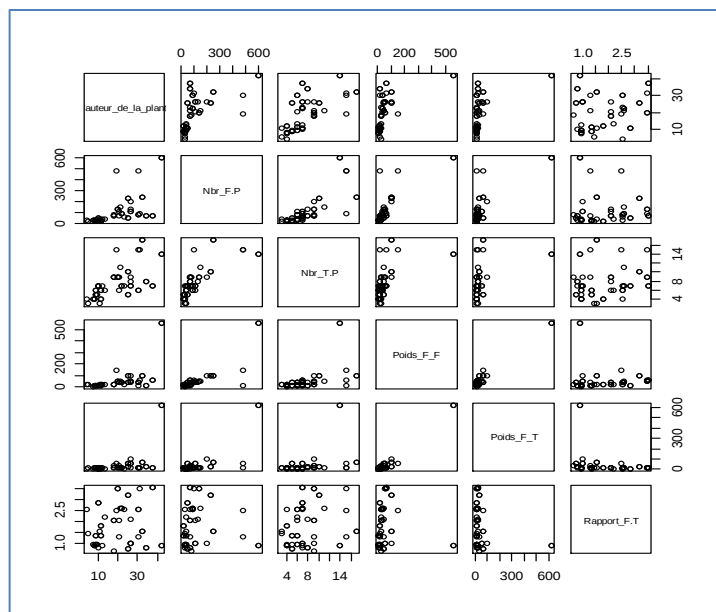


Figure 52 : Corrélation multiple entre les paramètres morphologiques

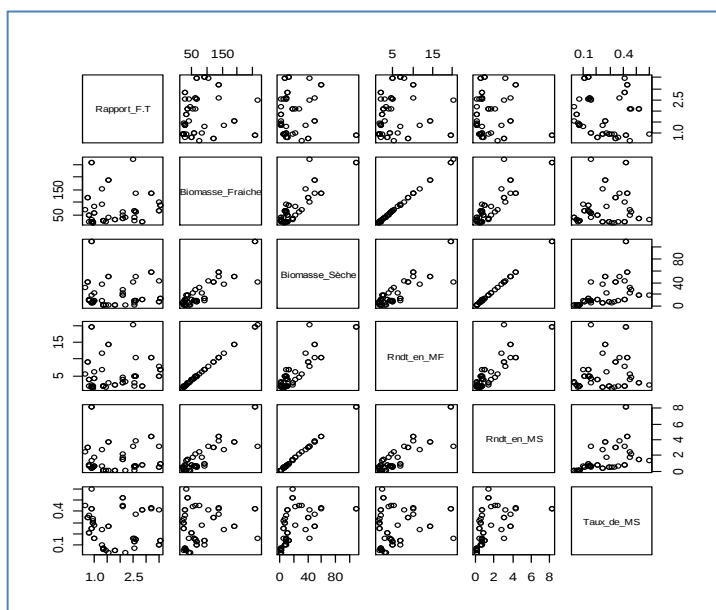


Figure 53 : Corrélation multiple entre les paramètres de rendement

Conclusion

En agriculture saharienne, l'utilisation des engrais chimiques est devenue plus-que nécessaire vu la pauvreté du sol, mais le raisonnement est strictement demandé. L'application des alternatives en cas de disponibilité est également demandée (amendement organique, inoculation, bio fertilisation...).

2.4. Essai d'inoculation des plantes du sulla en hors sol : inoculation indirecte

Les espèces des légumineuses sont connues par la symbiose bactérienne et la formation des nodules au niveau des racines, cette association a pour objectif de fixer l'azote atmosphérique N_2 en azote minéral assimilable par la plante NH_4^+ . Les légumineuses ont par conséquent un rôle agronomique majeur à jouer dans la gestion des flux azotés de systèmes de culture économes en intrants azotés, et performants du point de vue environnemental (Voisin *et al.*, 2015). L'association plante-bactérie se fait naturellement dans les habitats où se trouvent les deux partenaires biologiques dans la rhizosphère par des mécanismes biologiques et microbiologiques spécifiques et bien illustrés dans la littérature, suite à un dialogue moléculaire. Les plantes secrètent des flavonoïdes par lesquels elles sont identifiées par les bactéries compatibles, résultant par l'induction des gènes de nodulation (Stacey *et al.*, 2006). Ce phénomène biologique peut être surveillé par l'homme pour la re-végétation des zones dégradées dans le semi-aride (Chengyou *et al.*, 2017).

Selon la bibliographie scientifique dans le domaine, cette nodosité qui peut exister chez les espèces des légumineuses est établie avec des bactéries de genre *Rhizobium*, la famille des *Rhizobiaceae*. La symbiose constitue, en agriculture intensive, une alternative naturelle pour l'utilisation des engrais chimiques surtout azotés (Carpéné, 2013).

Chez le genre *Hedysarum*, la fixation symbiotique se fait par un genre spécial qui s'appelle *hedysari* (Akbarian *et al.*, 2021). Le nom commun du rhizobium du sulla est *Rhizobium hedysari*, mais à partir de 2002, la nouvelle espèce du *Rhizobium sullae* est rapportée (Fitouri *et al.*, 2012). Cependant, ces souches spécifiques au sulla ne se trouvent pas dans tous les biotopes, mais il y a une possibilité de transférer la souche vers des nouveaux habitats pour inoculer les plantes dans le but d'avoir une production en biomasse très importante (Mitchell and Morag, 2017). Ce rhizobium spécifique au sulla exige un ensemble de conditions pour faire la symbiose; conditions abiotiques types climatiques (température et l'humidité...) et pédologiques (salinité, éléments minéraux, pH...), et conditions biotiques (génotype, maladies, insectes...) (Mansouri, 2020). La sécheresse et la salinité sont généralement considérées des problèmes majeurs affectant la nodulation des espèces légumineuse (Gehlot *et al.*, 2012).

Dans nos études effectuées le long des années précédentes, nous remarquons toujours l'absence totale de ces nodosités chez toutes les plantes cultivées de toutes les espèces de *Hedysarum* introduites. La chose qui confirme l'absence absolue du rhizobium spécifique à ces espèces dans les sols sahariens. Dans ce contexte vient s'inscrire notre présente étude. La question biologique posée

pour entamer ce sujet était : y-t-il une possibilité d'avoir des plantes de *Hedysarum* avec des nodules efficaces dans la région d'étude dans le but d'optimiser l'utilisation des engrais azotés?

2.4.1. Evaluation du nombre de nodules en fonction des espèces du sulla

Le nombre de nodules formés, après inoculation indirecte et après une période de 100 jours, au niveau des racines des plantes cultivées du sulla a été évalué. On remarque une nette différence entre les trois espèces en terme de l'activité nodulaire qui est traduit par le nombre de nodules existants sur le système racinaire (**Figure 54, A**). La valeur moyenne la plus élevée des nodules est enregistrée chez l'espèce *Hedysarum flexuosum* qui provient de la région de Tizi-Ouzou (94,77 nodules), suivie par l'espèce *Hedysarum coronarium* avec une valeur de 88,66 nodules, et en fin *Hedysarum carnosum* a présenté la valeur moyenne la plus faible qui est de 52,55 nodules. Ces valeurs nous semblent très intéressantes si on les compare avec le témoin (sol local, sol dépourvu de la bactérie spécifique aux espèces du sulla) qui enregistre toujours la valeur de 0. Le nombre faible enregistré chez l'espèce de Biskra revient essentiellement à l'absence d'un échantillon du sol de la région. On note principalement que les trois espèces du sulla peuvent construire une relation symbiotique dans tous les traitements.

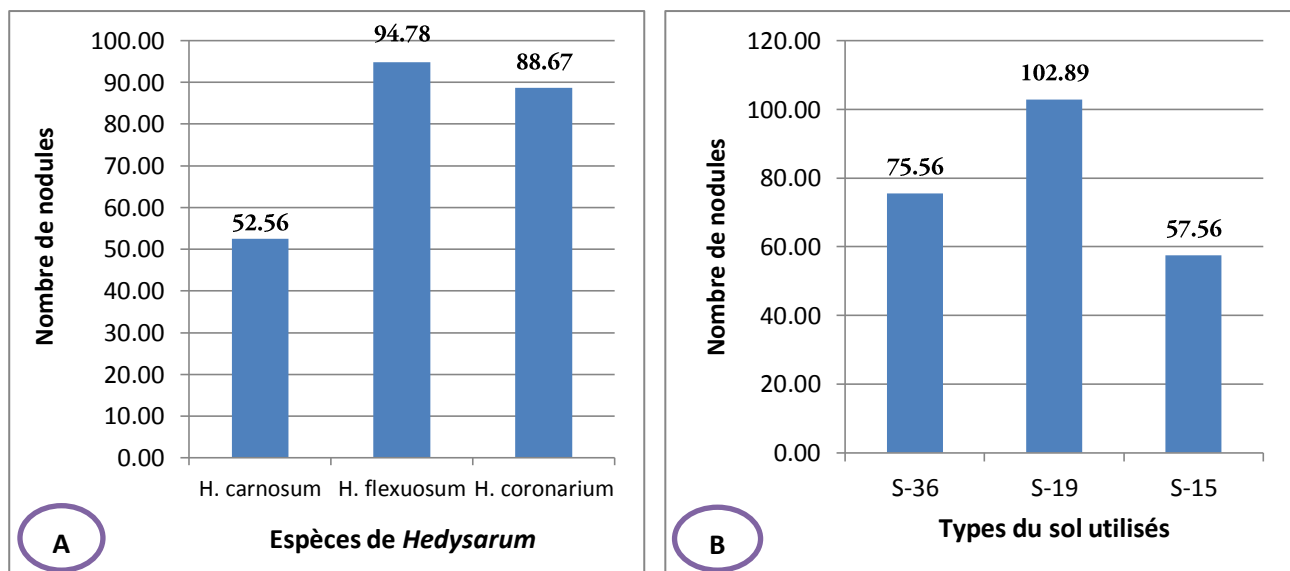


Figure 54 : Nombre de nodules formés sur les systèmes racinaires des plantes cultivées en fonction des espèces (A) et des types de sol (B)

2.4.2 Evaluation du nombre des nodules en fonction des types du sol

Dans la même expérience précédente, nous avons réalisé une évaluation d'un autre angle de vue, en fonction des types du sol utilisés, sachant que nous avons ramené les sols de trois régions différentes (El-Tarf, Sétif, Tizi-Ouzou). Le choix est basé essentiellement sur les habitats naturels des espèces

RÉSULTATS ET DISCUSSION

cultivées (sauf pour *Hedysarum carnosum*, nous n'avons pas pu ramener un échantillon). Mais la remarque qui est étonnante et inattendue, c'est la présence du rhizobium spécifique des trois espèces cultivées dans les trois types de sol choisis; d'où, nous avons enregistré des valeurs plus ou moins intéressantes pour tous les traitements. En lisant les résultats obtenus, on remarque ainsi une large différence entre les sols en ce qui concerne la formation des nodules au niveau des racines des plantes choisies (**Figure 54, B**).

Une concentration attentive sur la combinaison des deux facteurs (espèces du sulla, origines du sol) sur la production de nodules nous a aboutis à plusieurs constatations (**Figure 55**):

- le sol de Sétif a donné des résultats très intéressants sur le nombre de nodules chez toutes les espèces cultivées (116 ; 115,3 ; 105,67 nodules) surtout sur *Hedysarum flexuosum* et *Hedysarum coronarium*, la chose qui confirme la présence des trois rhizobiums spécifiques aux trois espèces du sulla dans ce sol;
- le sol de Tizi-Ouzou a provoqué la formation des nombres moyens des nodules sur les espèces cultivées, y compris l'espèce originaire de ce sol (*Hedysarum flexuosum*).
- le sol d'El-Tarf a enregistré des valeurs très différentes entre les espèces.

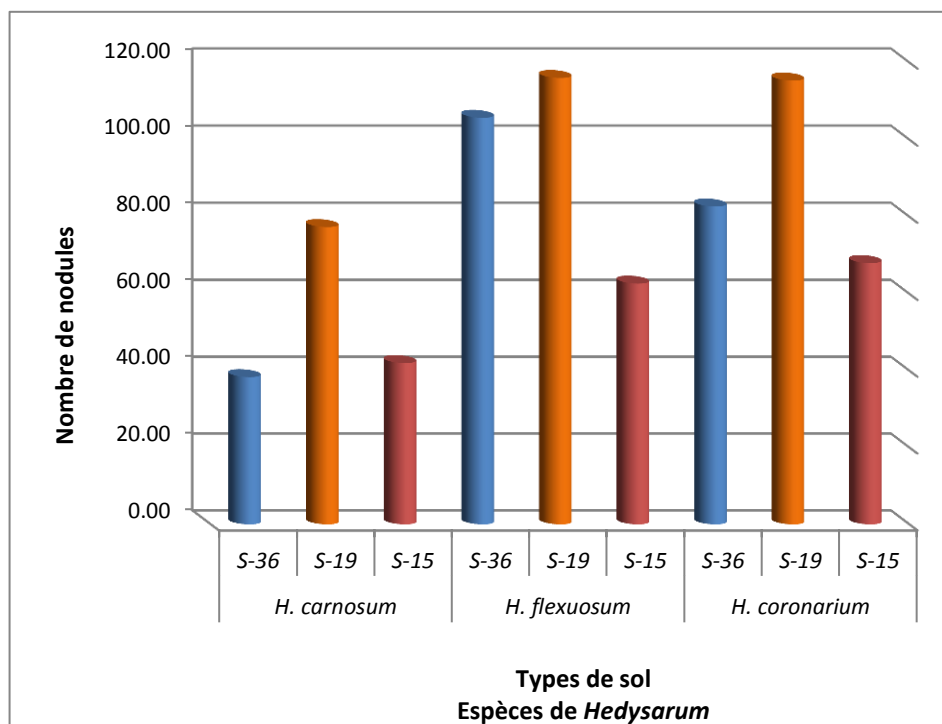


Figure 55 : Nombre de nodules formés au niveau des racines des plantes en fonction des espèces et des types du sol
(S-15 : sol de Tizi-Ouzou ; S-19 : sol de Sétif ; S-36 : sol d'El-Tarf)

Azib (2020) a travaillé sur la luzerne dans la région de Ouargla et Ghardaïa, il a trouvé des nombres très faibles allant de 4,3 à 12,9 nodules par plante (sans inoculation). Dans une étude tunisienne sur le sulla inoculé, le nombre de nodules par plante a varié de 3 nodules par plante en déficit hydrique (25% de réserve utile) à 88 nodules par plante en cas de 75% de réserve utile (Fitouri *et al.*, 2012).

Dans une autre expérimentation conduite en pot en Tunisie sur *Hedysarum coronarium* et en bonnes conditions d'irrigation et en présence d'une souche rhizobienne, le nombre de nodules a augmenté jusqu'à 230 nodules par plante (Fitouri, 2011). Nous avons signalé que *Hedysarum coronarium* présente une nodosité abondante, elle varie pour une population étudiée d'El-Tarf de 51 à 168 nodules par plante, soit une moyenne de 82,46 nodules (Moussaouali, 2014).

Chez une autre étude conduite sur *Phaseolus vulgaris*, le nombre de nodules enregistré est de 25,22 nodules par plante (Mansouri, 2020). Ces valeurs nous semblent très faibles lorsqu'on les compare avec celles obtenues dans notre essai. Sur la même espèce, des auteurs ont trouvé des nombres de nodules intéressants allant de 8,87 à 63,62 nodules par plante en deux cas différents : inoculation et non-inoculation (Viçosi *et al.*, 2020).

L'absence totale ou la présence d'un nombre faible de nodules chez les légumineuses peut être expliqué par la présence d'une faible population de rhizobiums dans le sol, ou bien par l'inhibition de la nodulation par des conditions environnementales défavorables tels que la salinité (Mansouri, 2020). Ainsi, la nodulation est largement affectée par la fertilisation azotée.

2.4.3. Analyse statistique des données

❖ 2.4.3.1. Test de normalité des données

Par le logiciel R, nous avons réalisé le test de normalité de Shapiro et Wilk pour les observations du nombre de nodules quantifiés au seuil de 0,05 pour confirmer la normalité des données.

Le test nous a donné un *p-value* très élevés, supérieur à 5%.

```
Shapiro-Wilk normality test
data: nomfich$Nombre_des_nodules
W = 0.96605, p-value = 0.5016
```

Donc, l'hypothèse H_0 de normalité est acceptée; autrement dit, les valeurs ont une distribution normale.

❖ 2.4.3.2. Test d'homogénéité des variances

Le test de Bartlett est utilisé pour vérifier l'hypothèse nulle, H_0 , d'après laquelle les variances d'une série statistique sont identiques, contre l'hypothèse alternative, H_1 , qu'au moins deux d'entre elles sont différentes. C'est un test paramétrique qui doit être évalué après la vérification de la normalité des données. Les résultats obtenus pour ce test sont présentés ci-dessous:

Bartlett test of homogeneity of variances
data: Nombre_des_nodules by Espèces
Bartlett's K-squared = 0.56696, df = 2, p -value = 0.7532

Bartlett test of homogeneity of variances
data: Nombre_des_nodules by Types_des_sols
Bartlett's K-squared = 1.5673, df = 2, p -value = 0.4567

Le test de Bartlett nous a donné des p -values supérieurs à 5% pour les deux critères de classification, cela veut dire que les variances des séries des données du nombre de nodules par espèces et par sols sont statistiquement homogènes.

❖ 2.4.3.3. Analyse de la variance

Après la confirmation des deux conditions précédentes, on procède à l'analyse de la variance à deux facteurs contrôlés: espèces cultivées et types du sol.

Cette analyse a mis en évidence une différence très hautement significative entre les espèces cultivées du sulla (*Hedysarum*) et les types du sol choisis ($p = 8.439e-05$; $p = 8.405e-05 < 0,001$ respectivement). Les espèces du sulla et les types du sol ont eu un effet clair sur le processus de la formation des nodules au niveau des racines des plantes et sur l'élévation de leur nombre (**Tableau 53**). Cependant, il n'y a aucune différence de l'interaction sur le paramètre en question ($p > 5\%$).

Le nombre des nodules par plante est nettement influencé par la provenance du sol, autrement dit, par la présence du rhizobium spécifique dans ce sol. Nous remarquons que les trois rhizobiums spécifiques des trois espèces du sulla se trouvent dans les trois sols échantillonnés, la chose qui confirme l'existence de ces espèces de *Hedysarum* dans la plupart des régions du nord de l'Algérie.

Selon Abdelguerfi *et al.* (1991), plusieurs espèces de *Hedysarum* ont été rencontrées lors des prospections en cortège floristique dans les prairies naturelles non dégradées (agriculture ou bâtiment), il a ajouté que *H. flexuosum* a été rencontrée en mélange avec *H. coronarium*. *Hedysarum*

flexuosum peut avoir une symbiose efficiente et des nodules actives avec seulement *Rhizobium sulae*, aucune autre souche ne peut le faire (Ezzakkioui et al., 2015).

Tableau 53 : Tableau de l'analyse de la variance du nombre des nodules en fonction des espèces et des sols

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr (>F)	Signi.
Espèces	2	9372.2	4686.1	16.5198	8.439e-05	***
Types des sols	2	9378.7	4689.3	16.5311	8.405e-05	***
Espèces : Types des sols	4	1727.1	431.8	1.5221	0.2379	NS
Résiduel	18	5106.0	283.7			

L'échantillon du sol provenant du Sétif a favorisé l'activité et l'efficience des souches bactériennes nodulantes présentes dans le sol, il a influencé efficacement sur la formation des nodules chez toutes les espèces cultivées. La différence du nombre moyen de nodules formés dans le sol provenant de Sétif représente un taux de 78,75% par rapport au sol provenant de Tizi-Ouzou et 47,48% par rapport à celui d'El-Tarf (**Figure 56**). L'inoculation du *sulla* par des souches rhizobiales semble plus avantageuse que la fertilisation azotée en termes de production fourragère et du nombre de nodules par plante même dans les conditions de déficit hydrique (Fitouri et al., 2012). Les pollutions des sols agricoles (métaux lourds par exemple) constituent une limite de la symbiose Rhizobium-légumineuse. Elles inhibent le processus de l'infection racinaire et affectent la formation des nodules conduisant à la réduction du nombre des nodules (Rahal et Chekireb, 2021).

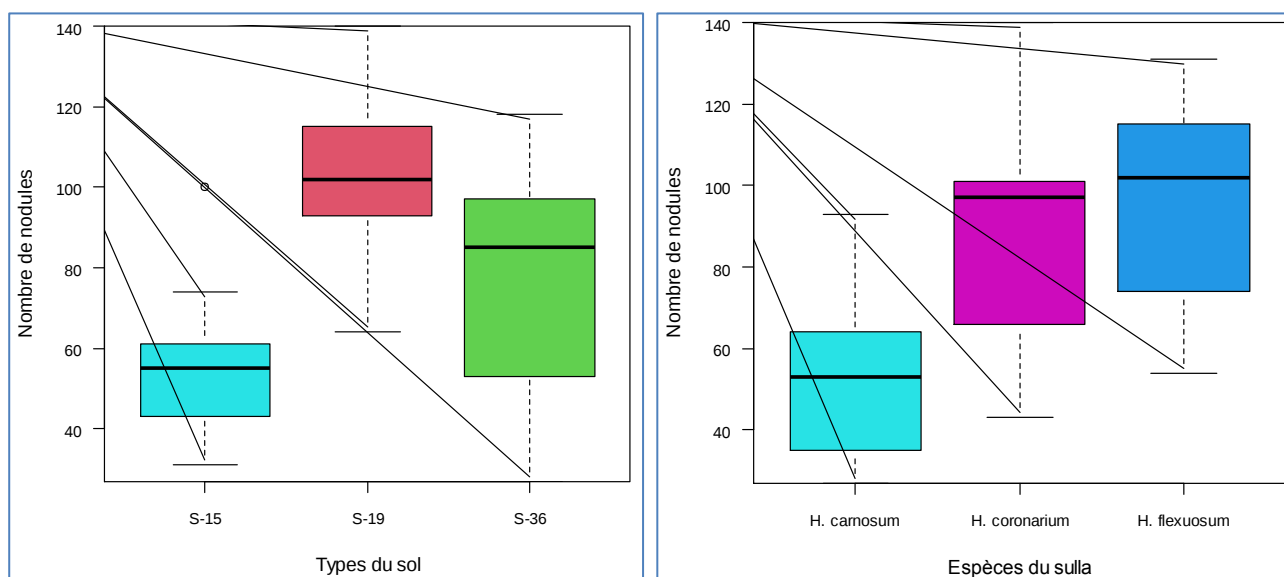


Figure 56 : Effet d'inoculation rhizobial indirecte sur le nombre des nodules en fonction des espèces et des sols
(S-15 : sol de Tizi-Ouzou ; S-19 : sol de Sétif ; S-36 : sol d'El-Tarf)

L'espèce *Hedysarum flexuosum* a manifesté un nombre moyen des nodules intéressant par rapport aux autres espèces (94,78 nodules). Ce chiffre représente une différence de 6,89% et de 80,33% par rapport aux valeurs moyennes et faibles respectivement (*H. coronarium*, *H. carnosum*).

Ces valeurs auront certainement une influence directe et intéressante sur la production fourragère, la qualité nutritive, la teneur en matières azotées, l'utilisation des intrants chimiques, exportation de l'azote minéral dans le sol, l'activité microbienne du compartiment vivant du sol...

❖ 2.4.3.4. Comparaisons multiples

Les résultats précédents ont manifesté l'effet des deux facteurs étudiés sur le nombre des nodules par plante (p -values < 0,001). L'application de test de Tukey (**Tableau 54**) par le logiciel R a pour objectif de classer les moyennes de la variable réponse en groupes distinctes.

Tableau 54 : Comparaisons multiples des moyennes de Tukey → Facteur : Espèces

Tukey multiple comparisons of means 95% family-wise confidence level factor levels have been ordered				
	diff	lower	upper	p adj
<i>H. coronarium</i> – <i>H. carnosum</i>	36.111	15.848	56.374	0.0007
<i>H. flexuosum</i> – <i>H. carnosum</i>	42.222	21.959	62.485	0.0001
<i>H. flexuosum</i> – <i>H. coronarium</i>	6.111	-14.152	26.374	0.7258

Nous observons une différence très hautement significative entre les espèces *H. coronarium* – *H. carnosum* d'un côté, et entre *H. flexuosum* – *H. carnosum* de l'autre côté ($p < 0,001$). Cependant, pas de différence entre les deux espèces *H. flexuosum* – *H. coronarium* sur le paramètre du nombre de nodules par plante (effet similaire) (**Tableau 55**).

Tableau 55 : Comparaisons multiples des moyennes de Tukey → Facteur : Types du sol

Tukey multiple comparisons of means 95% family-wise confidence level factor levels have been ordered				
	diff	lower	upper	p adj
S-36 – S-15	18.000	-2.263	38.263	0.087
S-19 – S-15	45.333	25.070	65.596	0.000
S-19 – S-36	27.333	7.070	47.596	0.008

D'après le tableau, elle existe une différence très hautement significative du nombre de nodules par plante entre les effets des sols S19 et S15 ($p < 0,001$). Ainsi, un effet hautement significatif entre les deux traitements S36 et S15 ($p < 0,01$). Enfin, l'absence d'effet entre les deux sols S36 et S15 sur le paramètre du nombre de nodules par plante (effet similaire).

❖ 2.4.3.5. Analyse qualitative des nodules formés

La forme de la nodosité est un caractère génétique spécifique, où nous remarquons des formes déterminées et des formes indéterminées (Azib, 2020). Elle est influencée sans doute par des facteurs et des conditions externes, en donnant plusieurs formes (**Figure 57**).

D'après les résultats de cette étude, nous avons remarqué une nette différence dans la forme et la structure des nodules induits au niveau des racines des plantes. Ces formes diffèrent clairement des nodules des régions d'origine. Cela est dû probablement aux conditions du milieu, surtout édaphiques, à savoir la texture et la structure du sol (fraction granulométrique); ou bien à une déformation phénotypique car ces nodules ont été formés pour la première fois dans ce sol.

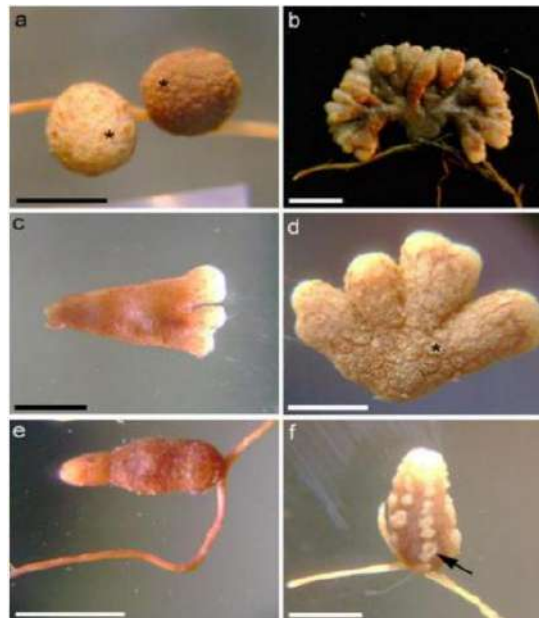
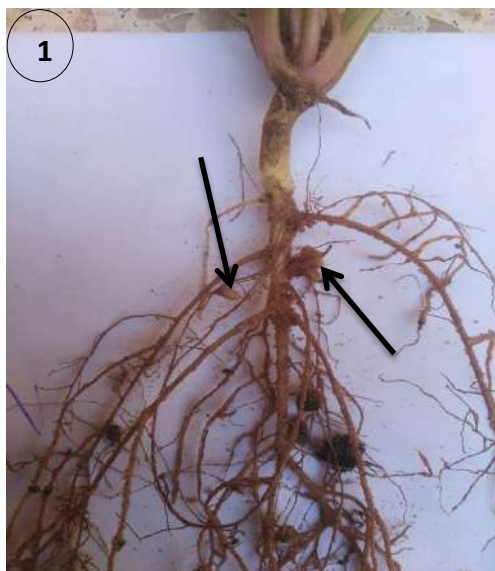


Figure 57 : Différentes formes de nodosités chez les légumineuses (Gehlot *et al.*, 2012)

Dans notre discussion, nous allons se référencier aux images illustrées dans la figure 32.

Les photos suivantes représentent les différentes nodosités observées au niveau des racines des espèces du sulla cultivée, soit prises directement ou sous une loupe biloculaire. Morphologiquement, elles apparaissent très différenciées. Selon Fitouri *et al.* (2012), la morphologie des nodosités est en relation étroite avec l'adaptation du sulla au stress du milieu (hydrique surtout).

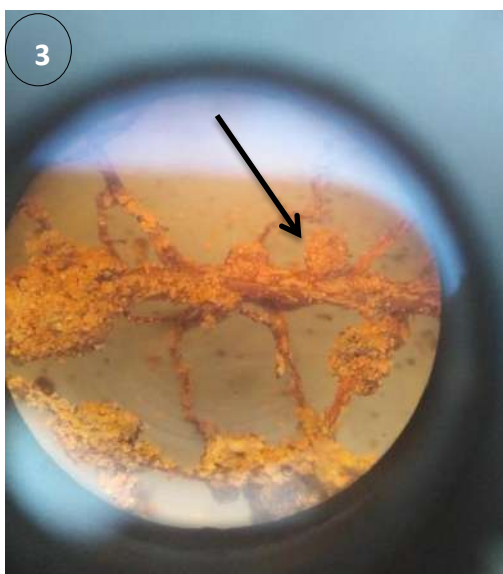
RÉSULTATS ET DISCUSSION



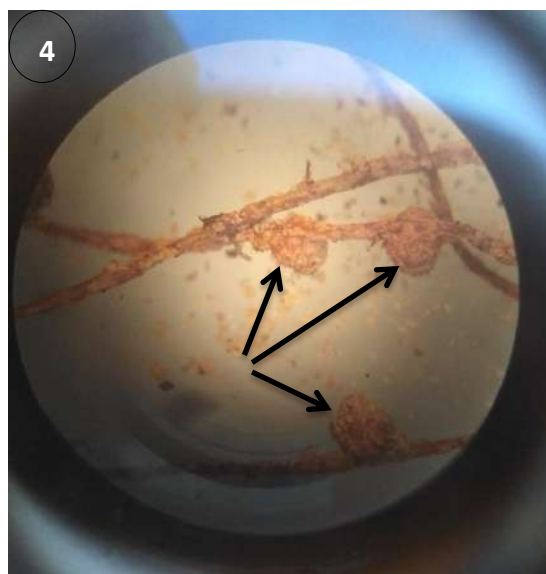
H.19



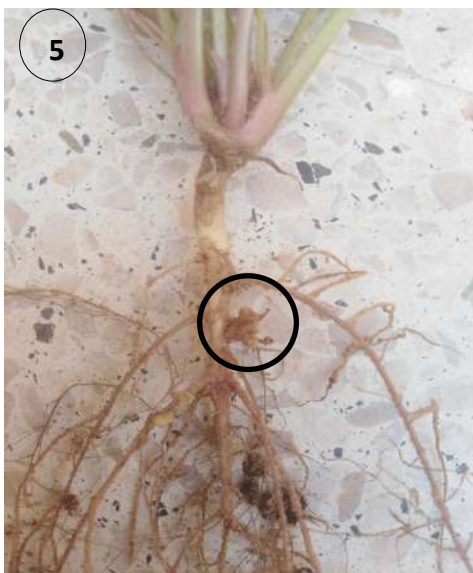
H.7



H.15



H.15



H.19



H.7

H.7/ *Hedysarum carnosum* – H.15/ *Hedysarum flexuosum* – H.19/ *Hedysarum coronarium*

D'après les photos précédentes, on remarque que les plantes ont formé de la nodosité à des différentes formes, même chez la même espèce (ex. *Hedysarum carnosum*).

En comparant les photos (1 à 6) avec la figure 57, nous trouvons que les photos 1 et 2 se ressemblent largement à la photo "c" et "d" de la figure 57; alors que la photo 6 manifestant une allure aplatie et un volume faible se ressemble à la photo "e" de la figure 57.

La forme volumineuse des nodules revient probablement à son adaptation à un stress hydrique sévère dans la rhizosphère, parce que les nodules en petite taille perdent vite leur réserves en eau (Fitouri, 2011). On peut trouver dans les zones marginales des souches bactériennes hautement tolérantes au stress hydrique comme c'est le cas dans les oasis tunisiennes (Mnasri *et al.*, 2007).

Conclusion

La nodosité des racines des légumineuses représente un véritable mécanisme biologique permettant les mutualismes entre les plantes hôtes et les bactéries, rendant l'agriculture en général plus saine et biologique. Les résultats obtenus dans cet essai expérimental constituent une clé de réussite pour la réalisation de ce projet sur le terrain. Jusqu'à nos jours et d'après nos connaissances, aucune étude expérimentale n'a été menée dans la région pour étudier la diversité des bactéries symbiotiques qui existent dans la région de Ghardaïa et moins encore son utilisation pour des objectifs d'inoculation.

Ce travail propose à sa fin de réalisation un ensemble de perspectives que doivent être exécutés sur le terrain dans les proches délais:

- Inoculation directe, ramener la souche rhizobiale spécifique du sulla de ses régions d'origine, l'amplifier puis inoculer des plantes directement au niveau des racines;
- Evaluation de l'effet de l'inoculation (directe et indirecte) sur la production en vert et sur le rendement fourrager;
- Fabrication des Biofertilisants (souche bactérienne enrobée et conservée sous forme de granules) servant des substituts biologiques à l'utilisation des engrais chimiques.
- Caractérisation des souches bactériennes trouvées au niveau des racines face aux contraintes biotiques et abiotiques, à savoir la salinité, la sécheresse, les températures élevées...
- Vérification de l'hypothèse de la nodulation d'une espèce donnée du sulla par un rhizobium d'une autre espèce.

2.5. Contribution à l'étude de la composition chimique des trois espèces fourragères cultivées du sulla

La production végétale et fourragère d'aujourd'hui doit fournir aux ruminants des produits de haute qualité nutritionnelle, dans l'objectif de minimiser ou limiter les intrants qui connaissent actuellement une hausse anormale des prix dans le marché local et international. D'après Aufrère et al. (2012), l'amélioration de la valeur alimentaire des espèces fourragères est devenue un élément essentiel pour stopper recours aux aliments complémentaires en ce qui concerne l'alimentation des animaux d'élevage, et par la suite, créer une autonomie alimentaire pour les systèmes d'élevage qui conduisent à une production plus respectueuse de l'environnement. La valeur nutritive des espèces fourragères destinées à l'alimentation des animaux herbivores et domestiques est généralement estimée par deux caractéristiques (Lemaire et Belanger, 2020):

- a. La teneur en protéines brutes (valeur protéique), appelée ainsi matière azotée totale, qui se ressemble à la concentration en azote totale (N%) : $PB\% = 6,25 \times N\%$.
- b. La concentration en énergie métabolisable (valeur énergétique) : c'est la teneur en énergie nette du fourrage, calculé en unité fourragère (UF), utilisé pour l'entretien et les productions de l'animal (L'UFL pour la lactation. L'UFV pour la production de viande).

Les espèces fourragères du genre *Hedysarum* présentent des caractéristiques intéressantes pour la production animale, surtout la teneur élevée en azote, en tannins condensés, en valeur énergétique... Le sulla du nord (*Hedysarum coronarium*) a une très grande valeur protéique et énergétique (Slim et Ben Jeddi, 2012 ; El Yemlahi et al., 2022), joue un rôle non-négligeable de point de vue agronomique, floristique et zootechnique. *Hedysarum flexuosum* est espèce fourragère qui présente une valeur nutritive très élevée qui se ressemble ou même dépasse celle de la luzerne cultivée (El Yemlahi et al., 2019 ; Zirmi-Zembri et Kadi, 2020 ; Zirmi-Zembri et Kadi, 2021), mais malheureusement elle est signalée dans la liste rouge des espèces en voie de disparition car elle est naturellement exploitée et elle n'est pas cultivée et domestiquée. *Hedysarum carnosum* présente ainsi des caractéristiques nutritives très intéressantes, à côté de son aptitude de croître dans des sols marginaux (salinité, sécheresse, pH...), elle renferme des taux élevés en matière sèche, composés secondaires..., elle est efficace contre les nématodes gastro-intestinaux des ruminants tel que *Haemonchus contortus* (Aïssa et al., 2016).

2.5.1. Matière azotée totale (MAT) ou protéine brute

La teneur d'un fourrage en matière azotée totale est influencée par plusieurs paramètres, agronomiques et génétiques; à savoir la fertilisation azotée, la période et le stade de la récolte, la

conservation du fourrage... d'après Houari et Chehma (2007), la saison de l'exploitation n'a pas d'effet sur la teneur en MAT. Dans cette nouvelle région de culture, le potentiel énergétique et nutritive des espèces cultivées va être touché et perturbé vu le changement du milieu et des conditions édapho-climatiques. La fertilisation azotée influence directement sur la teneur en matière azotée des fourrages. Elle augmente significativement la quantité de la matière sèche, la quantité de la matière azotée digestible et la quantité des unités fourragères (Demarquilly, 1970). Elle entraîne aussi une augmentation de la teneur des éléments minéraux majeurs dans les tissus végétaux.

Une différence très faible est trouvée entre les productions en protéines brutes par les espèces de *Hedysarum* cultivées. *Hedysarum carnosum* a enregistré une valeur élevée de 20,87% par rapport aux autres espèces (**Figure 58**): 17,43 pour *H. flexuosum* et 17,19% pour *H. coronarium*. Cela revient probablement à la ressemblance des conditions du nouveau milieu aux conditions du milieu naturel de *H. carnosum* (Biskra). Nos résultats obtenus concordent ceux signalés par Ben Jeddi (2005) chez quelques écotypes de *H. coronarium* : 19% de protéines brutes chez un écotype tunisien contre 14% de PB chez un écotype italien. Dans une autre étude menée sur 4 espèces fourragères, la valeur de protéines brutes varie de 7,90% à 11,13% (Manzoor *et al.*, 2013). La teneur en protéines brutes varie en fonction de stade de la plante, elle a évolué de 15,67% à 19,59% de MS entre le stade boutons floraux et le stade floraison chez *H. carnosum* (Aïssa *et al.*, 2016).

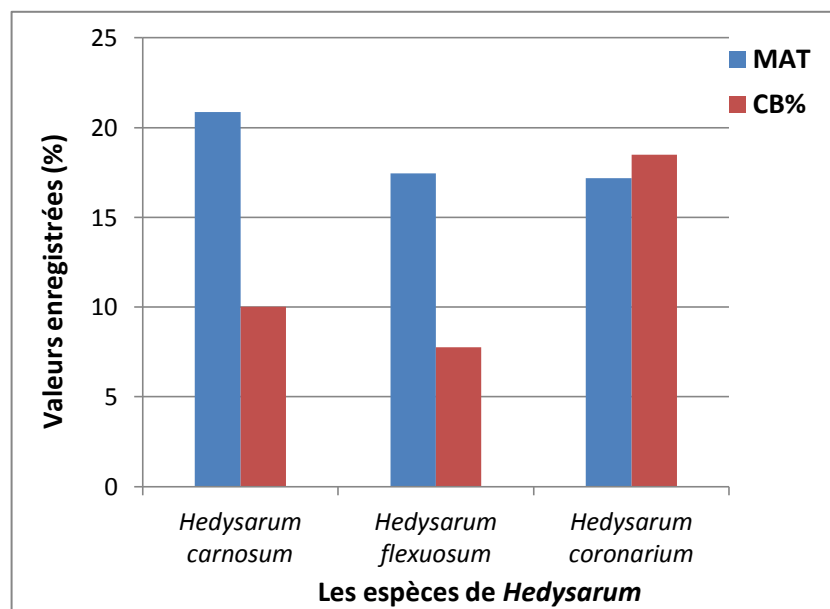


Figure 58 : Teneur en matière azotée totale MAT (%) et en cellulose brute CB (%) des trois espèces cultivées du sulla

D'après Baumont *et al.* (2009), les légumineuses ont une valeur azotée nettement supérieure à celle des graminées, et par la suite, une teneur en MAT plus élevée; donc un mélange céréales-légumineuses devrait donner une meilleure valeur azotée, voire même énergétique. La valeur azotée

des fourrages est affaiblie jusqu'à 10% par le fanage, d'où l'intérêt d'offrir le fourrage aux animaux à l'état frais. Selon Mayouf (2015), la faiblesse en azote des espèces végétales steppiques et sahariennes est liée aux stratégies d'adaptions des plantes aux conditions arides et difficiles.

2.5.2. Cellulose brute (CB)

C'est un paramètre à valeurs mesurées, essentiellement pour interpréter la qualité d'un fourrage, parce que c'est un constituant principal de la paroi des cellules végétales. Elle a une digestibilité intermédiaire par rapport à l'hémicellulose (modérément digestible) et la lignine (difficilement digestible ou indigestible). La cellulose brute n'évolue pas de la même façon chez les espèces du sulla. Elle évolue selon *les caractéristiques morphologiques et botaniques* de chaque espèce : les espèces herbacées annuelles contiennent moins de cellulose par rapport aux espèces pérennes; selon *le stade de développement de la plante* : les jeunes plantes contiennent moins de celluloses.

Sachant que la valeur nutritive d'un fourrage se trouve en corrélation négative avec sa richesse en cellulose (Ben jeddi, 2005). Il a trouvé dans son étude des teneurs intéressantes en CB allant de 0,1% à 9,7% chez quelques écotypes de sulla tunisienne. Cela veut dire que plus qu'un fourrage a une teneur élevée en cellulose brute, plus que sa valeur nutritive sera médiocre. Cette constatation est confirmée par Slim et Ben Jeddi (2012) : les valeurs les plus élevées de digestibilité de la matière organique correspondent aux valeurs de cellulose brute les plus faibles. D'autres auteurs ajoutent l'existence d'une corrélation négative entre la cellulose brute et la matière azotée totale (Amrani, 2021), cet auteur a enregistré une valeur de cellulose brute élevée de 42%. Dans cette étude, la teneur en CB est très élevée chez *H. coronarium* (18,49%), moyenne chez *H. carnosum* (10,02%) et faible chez *H. flexuosum* (7,76%) (**Figure 58**). Cela revient probablement au rapport feuilles sur tiges qui influence directement sur ce paramètre (Houari et Chehma, 2007), plus que la proportion des tiges augmente au détriment de celle des feuilles on enregistre des valeurs élevées en CB, et par la suite une qualité faible de fourrage.

La teneur d'un végétal en cellulose brute varie en fonction de quelques paramètres, à savoir: le stade des plantes au moment de la fauche (avant ou après la floraison), le type de fourrage (vert ou ensilé), l'année de production, la saison d'exploitation ... Elle varie chez le sulla ensilé de 21,6 à 27,0% et de 24,2 à 32,5% respectivement pour les fourrages de la 1^{ère} et la 2^{ème} année de culture. Au stade floraison du sulla de la 2^{ème} année, les taux de cellulose brute sont variables, de 24 à 32%; ils sont nettement supérieurs aux valeurs d'un ensilage de la 1^{ère} année de culture (Slim et Ben Jeddi, 2012). Pour les plantes spontanées des zones steppiques algériennes, les celluloses brutes varient entre 33,59% et 62,5% (Rekik, 2015), ce sont des valeurs trop élevées.

La variation entre les valeurs de cellulose brute peut être liée au stade de développement de la plante et/ou aux conditions édapho-climatiques du milieu (Amrani, 2021). Autres études ont signalé que le taux de la cellulose brute augmente significativement par l'influence des températures élevées dans les milieux arides (Chehma, 2005). D'après les valeurs obtenues, en les comparant avec les études antérieures sur la cellulose brute, on peut constater que les 3 espèces de *sulla* cultivées dans la région de Ghardaïa renferment une qualité nutritive supérieure de point de vue digestibilité.

2.5.3. Polyphénols et flavonoïdes

Les polyphénols (phénols totaux) sont des métabolites secondaires synthétisés par les végétaux, ils se trouvent dans les vacuoles des cellules. Ils ont un rôle principal dans la défense face à différents stress biotiques et abiotiques (pathogènes, rayonnements UV...) et contribuent à la qualité organoleptique des organes végétaux (Tlili, 2020). Ils sont reconnus par leurs propriétés biologiques (anti-radicalaire, antibactérien, anti-tumorale) et agronomiques. Il existe plusieurs familles des composés phénoliques : les flavonoïdes, les tannins et les acides phénoliques... Un fourrage qui contient une concentration modérée de flavonoïdes (2 à 4% de MS) peut avoir des effets bénéfiques sur le métabolisme des protéines chez les ruminants; alors que une concentration élevée (6 à 12 % MS) peut entraîner une diminution de la consommation volontaire des aliments, l'efficacité digestive et la productivité de l'animal (Aerts *et al.*, 1999, Aïssa *et al.*, 2016). Selon le milieu, Rios *et al.* (1992) cité par Ben Jeddi (2005) considèrent le *sulla* comme une espèce fourragère pastorale de haute qualité et palatabilité, vu ces caractéristiques nutritionnelles remarquables.

Les trois espèces de *sulla* cultivées dans la région de Ghardaïa présentent des teneurs variables en polyphénols, surtout pour les flavonoïdes (**Figure 59**).

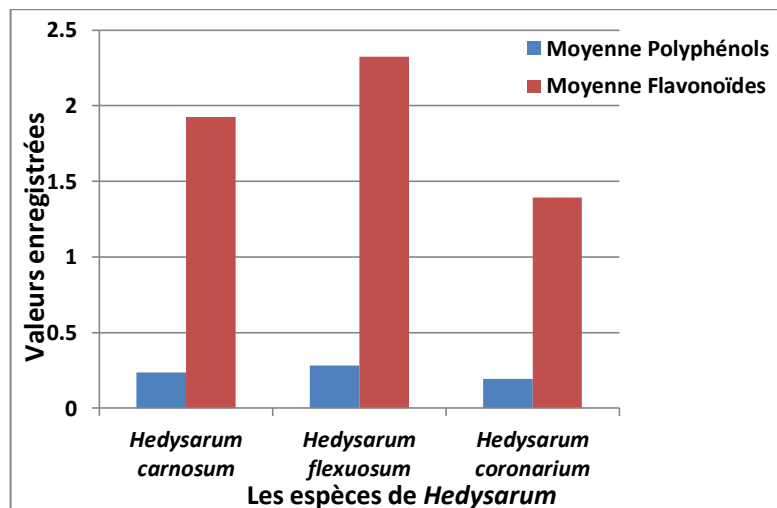


Figure 59 : Teneurs en Polyphénols et Flavonoïdes chez les espèces de *sulla*

D'après la figure 59, la teneur des plantes en flavonoïdes est située entre 2 et 4% MS, donc elles présentent des effets bénéfiques pour les ruminants (**Tableau 56**).

Tableau 56 : Valeurs moyennes ($\pm$ DS) des polyphénols et des flavonoïdes chez les 3 espèces du sulla

Espèces du <i>Hedysarum</i>	Moyenne Polyphénols	Moyenne Flavonoïdes
<i>Hedysarum carnosum</i>	0.237 $\pm$ 0.031	1.926 $\pm$ 0.082
<i>Hedysarum flexuosum</i>	0.283 $\pm$ 0.026	2.322 $\pm$ 0.499
<i>Hedysarum coronarium</i>	0.194 $\pm$ 0.035	1.393 $\pm$ 0.069

Aïssa *et al.* (2016) ont trouvé que sur *Hedysarum carnosum*, les polyphénols et les flavonoïdes sont impliqués dans l'activité anti-nématodes gastro-intestinaux. Le taux des phénols totaux chez la même espèce varie de 0,55% à 2,16%, et la valeur la plus élevée est enregistrée entre le stade formation des gousses et le stade formation des graines (Aïssa *et al.*, 2016).

Conclusion

La production fourragère dans les systèmes de production agricole saharien et oasien est strictement limitée par la culture de la luzerne pérenne, sous pivot ou sous-jacentes, et la composition chimique et la variation en valeur nutritive des plantes spontanées et cultivées entre les périodes et les saisons reste mal connue. Notons que la production fourragère la plus élevée et équilibrée en valeur nutritive est obtenue par des associations légumineuse-céréale, elles sont considérées comme un moyen efficace pour avoir une autonomie alimentaire pour un élevage productif du lait.

La valeur nutritive d'un fourrage destiné à l'alimentation des ruminants est généralement estimée par deux caractères: (i) sa concentration en protéines brutes (%) qui correspond fortement à la concentration en azote végétal (%); et (ii) sa teneur en énergie métabolisable qui représente la fraction du contenu énergétique total de la matière sèche fourragère potentiellement digérée et métabolisé par l'animal.

La démarche d'introduire des nouvelles espèces fourragères à haute qualité nutritive dans le système agricole oasien en vue d'enrichir le calendrier fourrager est une nécessité primordiale.

2.6. Inventaire préliminaire de l'entomofaune et des maladies de la culture du sulla introduite dans la région

Les cultures fourragères, comme toute autre type de culture, peuvent être exposées à des attaques par des agents biotiques et des espèces nuisibles. Dans ce sens, les espèces du sulla sont aptes à être frappées par différents êtres-vivants nuisibles, tels que les insectes, les champignons et les virus...

Suite à la réussite de la culture de quelques espèces du genre *Hedysarum* dans la région de Ghardaïa, nous voyons intéressant de continuer dans le sens de connaître l'entomofaune associée à la culture du sulla, ainsi de chercher les principales maladies qui les affectent. Par la présente étude, on participe à la préparation d'une base de données complète pour donner l'occasion aux autres chercheurs et phyto-protectionnistes de trouver des remèdes et des traitements.

C'est une étude préliminaire et basique, car c'est pour la première fois une étude pareille sera conduite dans la région, vu que l'introduction de ces espèces dans la région est vraiment nouvelle, et vu que c'est un domaine qui ne nous appartient pas.

2.6.1. Description préliminaire de l'entomofaune associé à la culture du sulla

L'entomofaune associé à une culture désigne la faune entomologique et l'ensemble des populations d'insectes présents dans un milieu autour d'une culture ou une plante, donc c'est la partie de la faune constituée par les insectes. Cette association ne signifie pas forcément qu'elle est nuisible, et elle est mise en évidence soit par un captage ou bien par observation des symptômes sur les parties attaquées.

❖ 2.6.1.1. Dénombrement des ordres et des familles rencontrées

L'objectif de cette partie est de recenser les espèces qui tournent autour des plantes de culture du sulla, les connaître par des outils spécialisés et les regrouper dans des familles et ordres. Après le captage des spécimens, nous avons traité les espèces une par une. Dans la plupart des cas, nous n'avons pas pu arriver au nom scientifique exact de l'individu, dans ce cas-là nous sommes contents de la famille seulement.

Au début, nous avons essayé d'identifier les insectes capturés, puis les séparés par ordre, et chaque ordre par famille suivant quelques caractères morphologiques de reconnaissance. Les résultats sont illustrés dans le tableau:

Tableau 57 : Listes des ordres et des familles rencontrées dans les parcelles

Ordres	Familles	Nombre d'individus
Hemiptera	<i>Delphacidae</i> <i>Tetrigidae</i> <i>Cicadilledae</i> <i>Pentatomidae</i>	22
Hymenoptera	<i>Formicidae</i> <i>Mymaridae</i> <i>Chrysididae</i>	20
Diptera	<i>Fanniidae</i> <i>Nematocera</i> <i>Tephritidae</i> <i>Ceratopogonidae</i>	7
Coleoptera	<i>Dermestidae</i> <i>Staphylinidae</i> <i>Anthicidae</i>	4
Arachnidae	<i>Salticidae</i> <i>Linyphiidae</i>	4
Lepidoptera	<i>Pyralidae</i>	2
Thysanoptera	<i>Thripidae</i>	2
Orthoptera	<i>Tetrigidae</i>	1
8 ordres	17 familles	61 individus

L'ensemble des individus capturés dans cette étude est de 61, ils sont regroupés en 8 ordres et 17 familles (**Tableau 57**): les deux ordres Hemiptera et Diptera avec 4 familles chacun sont constitués de 35% et 11% des individus, les ordres Hymenoptera et Coleoptera renferment chacun 3 familles avec 32% et 6% des individus, l'ordre des Arachnidae avec 2 familles (6% des individus) et le reste des ordres (Lepidoptera, Thysanoptera, Orthoptera) ont 1 famille chacun seulement avec 3% ; 3% et 2% des individus respectivement (**Figure 60**).

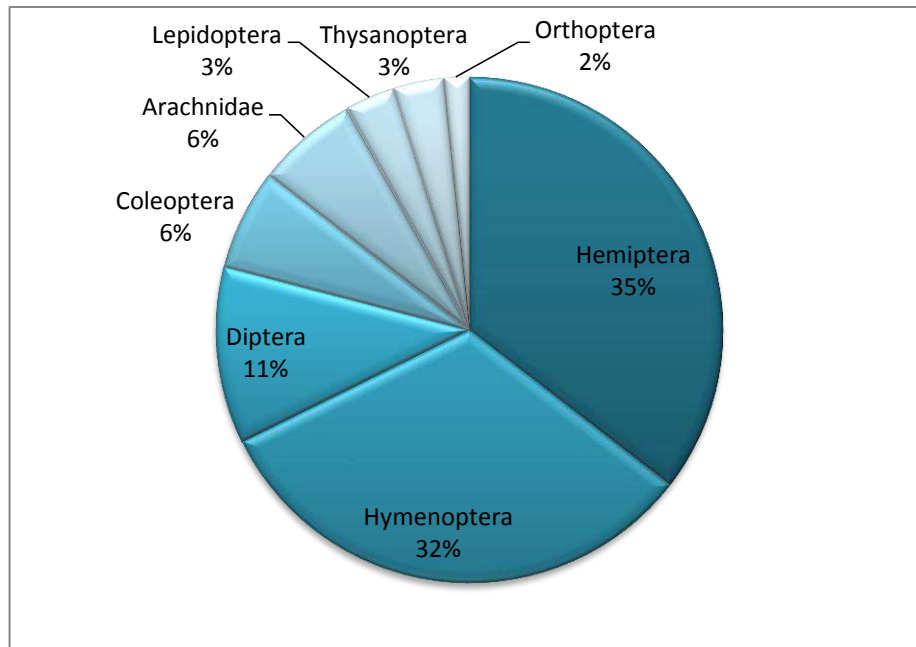


Figure 60 : Répartition des ordres recensés et pourcentage des individus capturés

L'ordre le moins représenté dans ce recensement est celui des orthoptères, cela revient probablement à la méthode employée dans la collecte des espèces (on n'a pas utilisé les méthodes qui concernent les insectes volants). Alors que l'ordre le plus présent est celui des hémiptères, car la majorité de ces espèces (90 %) sont des phytophages suceurs de la sève élaborée. A cet effet, ces insectes sont fréquents chez les plantes du sulla cultivées. Notons que les sulla est autogame, mais ils préfèrent le système de pollinisation croisée, cela exige obligatoirement la présence des espèces autour des plantes. Cependant, Pinzanti et Magnani (1981) cité par Ben Jeddi (2005), explique que la présence des insectes est nécessaire pour la bonne réalisation de la pollinisation qui conduit à une bonne production de semences.

La famille la plus abondante dans notre étude est les Cicadilledae avec 18 espèces, alors que les familles qui ont enregistré le nombre le faible des espèces (1 seule) sont les Chrysididae, Nematocera, Mymaridae, Fanniidae, Pentatomidae et Delphacidae. Notons que 47,06% des familles ont seulement 2 espèces recensées, et plus de 50% des espèces appartiennent à la famille des Formicidae (les fourmis). Sur le champ et le long de période du suivi, nous avons remarqué l'abondance de ces insectes dans les parcelles. Les fourmis ont, dans la plupart des cas, des effets négatifs sur les cultures, ils attaquent clairement les tiges et les feuilles surtout juvéniles (**Figure 61**).



Figure 61 : Signes d'attaque de la culture du sulla par des insectes

❖ 2.6.1.2. Dénombrement et classification des espèces rencontrées selon les types de culture

La collecte des espèces a été effectuée selon les trois types de culture : *Hedysarum coronarium*, *Hedysarum carnosum* et *Hedysarum flexuosum*. De chaque parcelle élémentaire contenant une espèce du sulla, nous avons installé l'outil de captage et nous avons collecté des insectes.

Nous avons classé ces individus d'insectes selon ces trois espèces du sulla cultivées en vue d'avoir une idée sur la relation qui existe entre l'espèce du sulla et la présence des insectes autour de cette espèce. L'attraction d'une espèce d'insecte donnée vers une plante quelconque est certainement due à un bénéfice visé. Nous avons obtenus les résultats suivants:

- *Hedysarum coronarium*, avec 9 espèces; 14,75% des espèces recensées;
- *Hedysarum carnosum*, avec 52 espèces; 85,24% des espèces recensées;
- *Hedysarum flexuosum*, avec 15 espèces; 24,59% des espèces recensées

En considérant les espèces individuellement, on remarque que les espèces suivantes : *Agallia spp*, *Musca sp*, *Monomorium sp* sont présentes chez toutes les espèces du sulla cultivées. Les espèces suivantes : *Aphis spp*, *Nilaparvata spp*, *Geocoris spp*, *Chrysis spp*, *Stricticollis spp*, *Bledius spp*, *Dermestes spp*, *Tetrix spp*, *Thrips spp* sont présentes chez une seule culture. L'espèce *Culicoïde spp* est la plus fréquente entre les 3 espèces du sulla, elle se trouve au niveau de l'espèce *Hedysarum carnosum* (12 individus trouvés, représentant 19,67% de tous les individus).

Il nous semble que l'espèce végétale joue un rôle important dans la distribution de ces insectes, la richesse en vitamines et l'abondance de la sève dans les vaisseaux ainsi que la couleur des fleurs et leur richesse en nectar attirent les insectes. L'humidité du sol influe significativement sur la présence et l'abondance des insectes nuisibles. Comme nous l'avons cité précédemment, nos espèces du sulla cultivées ont souffert de plusieurs attaques soit au niveau des feuilles et des tiges qui conduisent à

une régression de productions fourragères, soit au niveau des fleurs qui aboutissent à des pertes non négligeables des fleurs et une faible production semencière.

Discussion

Au cours de cette expérience, et sur toutes les espèces, nous avons observé des symptômes clairs sur toutes les parties végétales (feuilles, tiges, racines, fleurs, gousses, articles): jaunissement des feuilles, chute des feuilles et des fleurs, flétrissement général, ramollissement des tiges, tache noirs sur les tiges et des racines, piqures sur les articles des gousses... Nous précisons d'abord que les insectes trouvés dans la collecte ne sont pas forcément des espèces nuisibles laissant des signes d'attaque et de nuisibilité sur les plantes.

Les espèces collectées sont très diversifiées, nous trouvons même des espèces domestiques des maisons parce que notre culture est installée dans les environs des oasis où se trouve l'homme. A titre d'exemple, on trouve *Musca domestica* qui est un insecte domestique associé à l'homme. L'espèce *Monomorium sp* est la fourmi qui est nuisible pour les plantes, elle attaque les racines et les jeunes tiges souples et même le nectar des fleurs. Les fourmis nouent des relations solides avec les végétaux, qui peuvent être soit une symbiose, un commensalisme ou un parasitisme; ils ont trouvé deux espèces dans des milieux cultivés: *Monomorium areniphilum* et *Monomorium salomonis*. (Bouzekri *et al.*, 2015). Sur les espèces cultivées, nous avons observé la présence un nombre très élevé des espèces appartenant à la famille des *Aphididae*, du genre *Aphis* ou *Schizaphis*..., il nous semble que ce sont des *Aphis faba* parce que le sulla est cultivé dans une région où la culture des fèves est très répandue. Nous avons capturé des photos de ces espèces (**Figure 62**):



Figure 62 : individus du genre *Aphis* (originale, 2022)

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Dans notre étude, on n'a pas observé des attaques de ces *Aphis* sur les parties végétatives des plantes cultivées, seulement des quantités des excréments observées sur la surface des feuilles.

- Sur les graines, on peut recenser plusieurs espèces d'insectes qui attaquent les graines et les gousses. Elles aboutissent à des pertes énormes de la semence. Nous avons observé des insectes au niveau des graines avec des effectifs très élevés attaquant le contenu des articles, ce sont des coléoptères; les espèces les plus notées redoutables sont (Delobel et Delobel, 2003):

- *Bruchidius imbricornis* : noté sur *Hedysarum coronarium*. Toutes les espèces des bruches se nourrissent au stade immature en rongant l'intérieur des graines de leurs plantes hôtes, souvent des légumineuses (**Figure 63**). La plante nourricière attitrée de *Bruchidius imbricornis* est le sainfoin d'Espagne, le sulla (Bagnée et al., 2021). L'aire géographique de ce *Bruchidius* s'étend vers l'Asie, le Caucase et l'Iran et elle inclut aussi dans l'Afrique du Nord, l'Algérie et le Maroc (Anton, 2010 cité par Bagnée et al., 2021).

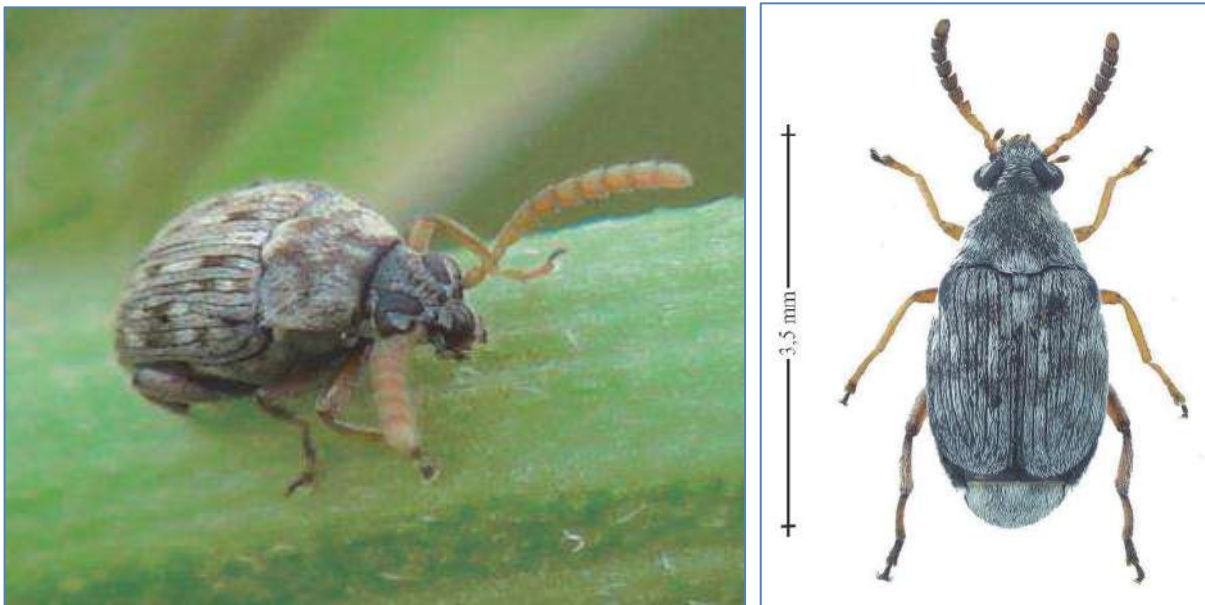


Figure 63 : Adulte de *Bruchidius imbricornis* (Bagnée et al., 2021)

D'autres espèces ont été citées dans la littérature: *B. occidentalis*, *B. siliquastri*, *B. brachialis*... mais leur effet sur le sulla n'est pas confirmé.

Nous avons observé cet insecte au niveau des graines avec des effectifs très élevés. Ils ouvrent des orifices au niveau de la surface des articles des gousses, et se nourrissent à la graine en la détruisant entièrement (Tuda, 2007). Selon Bagnée et al., (2021), son émergence commence en mai, et les accouplements et les pontes ont lieu sur d'autres espèces jusqu'en septembre (période de la

sénescence du sulla), et le développement larvaire se déroule dans les graines de la plante en quatre stades entre juin et février de l'année suivante.

- *Bruchidius pygmaeus*: noté sur *Hedysarum coronarium*.

- *Paleoacanthoscelides gilvus*: noté sur *Hedysarum coronarium*, *H. flexuosum* et *H. spinosissimum*. Son aire de distribution est l'Afrique du nord, le sud d'Europe, Chypre, Turquie, Iran, Iraq et l'Asie centrale (Ghahari et Borowiec, 2017).

2.6.2. Description préliminaire des principales maladies affectant la culture du sulla

Chez les plantes, une maladie signifie un état de dysfonctionnement ou un phénotype anormal. Elle est détectée ou mise en évidence seulement par des écarts fonctionnels appelés symptômes, en comparant la plante suspect avec une autre saine ou à phénotype normal. Les agents causants ces maladies, généralement infectieuses, sont multiples: les champignons, les phyto-virus, les bactéries.

Au cours de nos cultures, nous avons mis au point plusieurs états d'attaques inconnus (**Figure 64**), qui doivent être expliqués en cherchant la source d'attaque et l'agent causal à partir des symptômes. Malgré-que nous utilisons toujours le terreau commercial qui est, soi-disant, inerte.



Figure 64 : Symptômes observés chez les plantules du sulla après le semis

❖ 3.6.2.1. Désignation des maladies avant le semis (sur les semences) : au laboratoire

Les semences constituent une étape de cycle végétatif des plantes, qui peut être frappée par des agents biotiques affectant négativement le démarrage des cultures.

Dans ce sens, nous avons choisi de chercher et d'identifier les agents causals des maladies au niveau des graines avant la mise en culture. Nous avons utilisé les semences des trois espèces du sulla (*Hedysarum coronarium*, *Hedysarum carnosum*, *Hedysarum flexuosum*) pour cette expérience. Dans des boîtes de Pétri, nous avons préparé un milieu de culture de *Sabouraud* pour la croissance des champignons.

■ Après 4 jours de la mise en culture (inoculation), nous avons remarqué:

- Sur *H. carnosum* et *H. coronarium*: nous avons observé des colonies sphériques en développement situées à la surface de milieu de culture, entourant les graines, elles ont une couleur rose.
- Sur *H. flexuosum*: quelques graines sont entourées par des colonies rondes de couleur verte.

Ces colonies confirment la présence des agents pathogènes nuisibles, probablement d'origine fongique. La forme microscopique de ces spécimens peut nous donner le type exact.

■ Après 2 jours de l'observation précédente, soit 6 jours après l'incubation, nous avons observé:

- Sur *H. carnosum* et *H. coronarium*: une croissance rapide des colonies rondes signalées dans l'observation précédente, avec des couleurs différentes : verte, jaune, violette.
- Sur *H. flexuosum*: une croissance rapides des colonies, de tailles différentes, de couleur rose jaunâtre. Avec une colonie très grande située dans le bord de la boîte de Pétri de couleur verte.

❖ 3.6.2.2. Désignation des maladies après la mise en culture: au laboratoire

Un mois après les manipulations précédentes, nous avons essayé de chercher la présence de ces agents pathogènes au niveau des parties végétales: feuilles, tiges, racine, fleurs.

■ Sur les feuilles: au stade végétatif, nous avons remarqué des colonies qui entourent les échantillons des feuilles des trois espèces du sulla. La croissance de ces colonies est très rapide, elles sont de couleur blanche et d'une texture laineuse.

■ Sur les racines: au même stade précédent, nous avons constaté la présence des colonies sphériques, entourant les échantillons des racines des trois espèces du sulla. Ces colonies sont de couleur violette et rose jaunâtre.

■ Sur les fleurs: au stade floraison, nous avons observé ainsi des colonies autour des échantillons des fleurs qui sont de couleur rose jaunâtre. Ainsi, la chute des fleurs est observée chez les trois espèces cultivées du sulla (**Figure 65**).



Figure 65: Chute des fleurs du sulla (A: fanaison des fleurs ; B: stade avancé de la chute des fleurs) (originales, 2021)

Discussion

Au cours de cette expérience, et sur les trois espèces cultivées, nous avons observé des symptômes clairs sur toutes les parties végétales (feuilles, tiges, racines, fleurs, gousses, articles): jaunissement des feuilles, chute des feuilles et des fleurs, flétrissement général, ramollissement des tiges, tache noirs sur les tiges, piqures sur les articles des gousses...

Dans cette partie, les colonies obtenues dans chaque boîte de Pétri a été examinée au laboratoire de Mycologie en vue d'identifier les types d'agresseurs existants autour du matériel biologique. D'après les résultats illustrés auparavant, et la texture des colonies observées autour des échantillons, nous pouvons conclure que ce sont des mycéliums d'un ou plusieurs champignons nuisibles, il s'agit d'une (des) maladie fongique :

- les premières constatations après les observations et les comparaisons avec d'autres travaux, quand une plante infectée ou touchée par un champignon, les feuilles et les pétioles se flétrissent et présentent des couleurs rouge jaune et bronze (Riley *et al.*, 2004), ce champignon est le *Rhizoctonia solani* (**Figure 66**), qui a l'aptitude d'occasionner des dégâts flagrants en réduisant la culture du sulla et son utilisation comme fourrage en Australie (pays qui a introduit 23 espèces du sulla dans ses terres dans les années 70s, particulièrement *Hedysarum coronarium*). *H. coronarium*

RÉSULTATS ET DISCUSSION

est signalé comme espèce sensible à la pourriture du collet et des racines causée par *Rhizoctonia solani* (Ryley *et al.*, 2004). Cet agent fongique cause des dommages très graves au niveau des feuilles et des racines conduisant à la mort des plantes, il se trouve chez différents genres: *Hedysarum*, *Medicago*, *Ornithopus* et *Trifolium* (You et Barbetti, 2019).

L'infection par ce champignon est très rapide, en cas de présence de l'agent autour de la plante, les premiers symptômes seront visibles vers le 11^{ème} jour après le semis, puis le fanage des feuilles et la chute des pétioles. Ensuite, au bout de 14^{ème} jour après le semis, on assiste à un flétrissement général et la mort de la plante. En comparant les plantes saines avec d'autres malades, on remarque que le premier groupe est caractérisé par des racines vigoureuses longues épaisses et composées des racines secondaires nombreuses de couleur blanche (Ryley *et al.*, 2004); par contre, le 2^{ème} groupe renferme des racines chétives, courtes et de couleur brunes.

Les plantes de *Hedysarum* sont attaquées par ce champignon parce que ces spores existent abondamment dans les cultures, soit en Algérie ou dans la région d'étude. Il peut attaquer une longue liste des espèces végétales cultivées actuellement: la luzerne (*Medicago sativa*), le soja (*Glycine max*), betterave à sucre (*Beta vulgaris*), haricot de Lima (*Phaseolus lunatus*), haricot vert (*Phaseolus vulgaris*), pois de senteur (*Lathyrus odoratus*), maïs (*Zea mays*), sorgho (*Sorghum bicolor*), niébé (*Vigna sinensis*), blé tendre (*Triticum aestivum*), orge (*Hordeum vulgare*)... et autres espèces des graminées (Sumner, 1985 ; Furgal-Wegrzycka *et al.*, 1998). Ces auteurs considèrent que ce champignon est très virulent, il se trouve entre 187 et 492 unités de colonies par 100 g du sol.

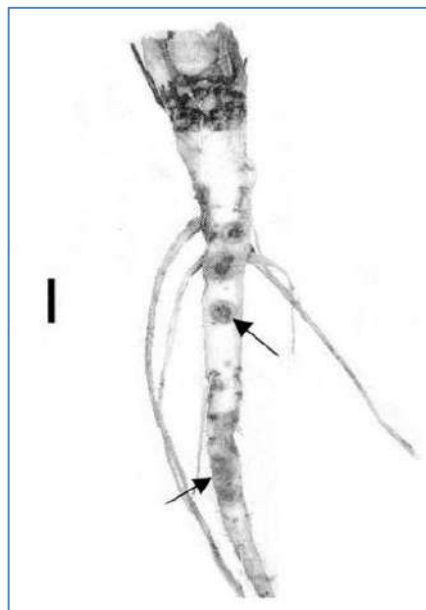


Figure 66 : Lésions sur racines de *H. coronarium* causées par le champignon *Rhizoctonia solani* (Ryley *et al.*, 2004)

- Un autre agent pathogène, type cryptogamique, a été annoncé suite à une comparaison profonde entre les symptômes et la littérature: c'est l'agent pathogène des pourritures des racines : *Phytophthora medicaginis* qui attaque les racines de plusieurs espèces de *Hedysarum*. D'après Hanson et Maxwell (1991), une autre espèce de ce genre : *Phytophthora Megasperma* est considérée comme pathogène des autres espèces de fabacées qui lui-sont sensibles: les pois-chiches, la luzerne, le chou-fleur, le soja... Une étude effectuée sur 3 espèces du *Hedysarum* en Australie (*H. coronarium*, *H. carnosum*, *H. flexuosum*) confirme que ces espèces sont très sensibles à cet agent de *Phytophthora*; et à titre individuel, et en ce qui concerne la sensibilité et la mortalité des espèces du sulla à cause de pathogène, *Hedysarum carnosum* semble significativement la plus susceptible (Southwell et Crocker, 2005).

Phytophthora clandestina, un autre agent pathogène considéré très virulent pour les espèces de trèfle *Trifolium sp.*, signalé en 2009 en Australie, qui peut attaquer plusieurs espèces de légumineuses y compris les espèces introduites dans le pays; mais *Hedysarum coronarium* présente une résistance très hautement significative contre cette maladie qui se manifeste particulièrement sur les racines (Li *et al.*, 2009).

En cas d'inoculation artificielle, les symptômes de *Phytophthora medicaginis* commencent à apparaître dès le 7^{ème} jour après la plantation, et cet agent pathogène peut tuer les plantes du sulla au bout de 11^{ème} jours après la plantation. Cela veut dire que c'est un agent fongique très virulent. Les symptômes de cet agent peuvent se manifester sur toutes les parties de la plante, la racine principale et les racines latérales se dessèchent, chez les jeunes plantules des lésions apparaissent sur la tige jusqu'à quelques centimètres au-dessus de niveau du sol (Moore *et al.*, 2011).

En cas de présence de ce champignon dans un sol cultivé, l'intégration de la culture du sulla dans le système de rotation est strictement déconseillée, car ces espèces auront peu de chance d'être des cultures de rupture dans la réduction de cette maladie. Les spores de ce champignon peuvent persister dans le sol des longues périodes allant jusqu'à 10 ans (Moore *et al.*, 2011).

- selon les symptômes observés sur les plantes des trois espèces cultivées du sulla (**Figure 67**), nous avons constaté la présence d'un troisième champignon du type tellurique, *Fusarium oxysporum*, famille des *Nectriaceae*, (sans arriver à la désignation de sa forme spéciale), et après des observations microscopiques et des comparaisons bibliographiques nous avons confirmé le pathogène. La multiplication végétative de ce champignon aboutit à la production de deux types de conidies : des macro-conidies et des micro-conidies. Les macro-conidies sont falciformes et cloisonnées (trois ou quatre cloisons), produites par un regroupement de conidiophores. Les micro-

RÉSULTATS ET DISCUSSION

conidies sont non cloisonnées, de forme ellipsoïdale. Ces amas de conidiophores se ressemblent à des petits amas gélatineux. Ces champignons survivent dans les résidus végétaux restants dans le sol. Les symptômes observés sur nos plantes sont: le jaunissement et la chute des feuilles, la pourriture des racines et des semences et la fonte de semis.

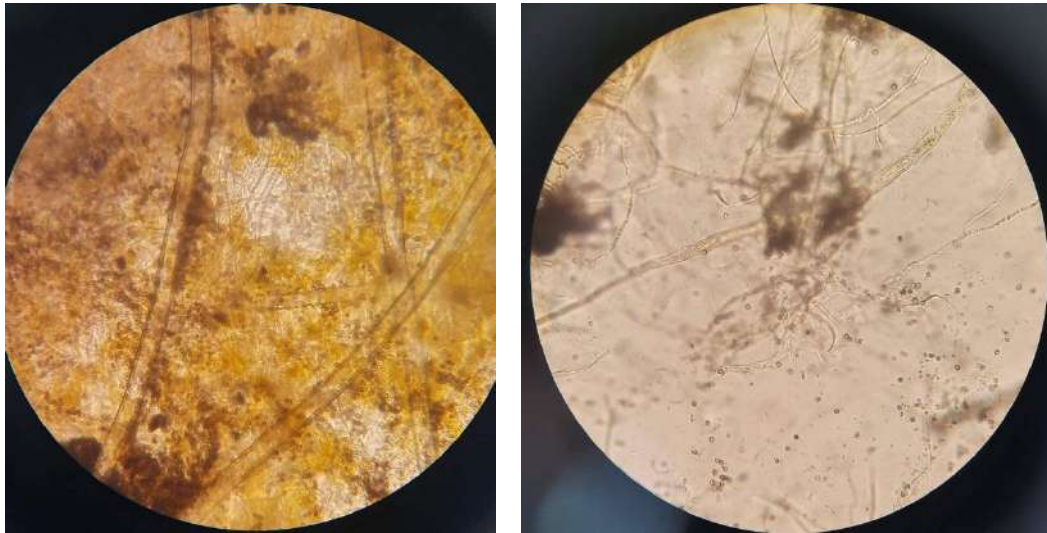


Figure 67 : Observation microscopique de *Fusarium* sur les racines (Original, 2022)

- d'après les symptômes observés et la bibliographie consultée, il nous semble la présence d'un agent pathogène cryptogamique : l'oïdium.

Selon Ben Jeddi (2005), le sulla cultivé (origine italienne) est connu par sa sensibilité aux maladies cryptogamiques notamment à l'oïdium, *Erysiphe trifolii* var. *intermedia*, qui provoque la chute de la production fourragère. Cette sensibilité à l'oïdium rend la plante plus en plus non appréciée par les éleveurs. Ce champignon est introduit dans les pays où le sulla n'est pas indigène par les essais de transfert des gènes d'une génération à une autre pour n'importe quelle raison (amélioration, adaptation, résistance...). Sarno et al. (1978) cité par Ben Jeddi (2005) ont montré que les populations ayant une floraison tardive sont par conséquent plus sensibles à l'oïdium.

- Un autre agent pathogène, type viral, a été annoncé par des auteurs. Il attaque les feuilles du sulla, c'est le virus de mosaïque de la luzerne (VML). Diverses légumineuses fourragères et pastorales présentent une sensibilité variable à l'égard de ce virus. Elles sont classées de "résistantes" comme *Hedysarum coronarium*, à "hautement sensibles" tels que *Ornithopus sativus* (l'ornithope cultivé, fabacées) et *Trifolium resupinatum* (trèfle renversé, fabacées) (Latham et Jones, 2001 ; McKirdy et al., 2000). Selon la bibliographie, le VML provoque la chute des rendements en fourrages jusqu'à plus de 70% chez les espèces du genre *Trifolium* (McKirdy et al., 2000).

D'après notre recherche, nous avons remarqué que les publications et les recherches scientifiques qui concernent les maladies et les ravageurs des espèces de sulla (*Hedysarum sp.*) sont arrêtées dans la première décennie de 21^{ème} siècle, et la majorité des études ont été réalisées en Australie vu-que les sullas sont nouvellement introduites dans ce territoire (les années 70s) comme cultures fourragères. Il nous semble que le manque d'études pareilles dans les pays de la méditerrané, comme l'Algérie, Tunisie, Maroc, Italie, Espagne... revient à la négligence attribuée à cette culture (laissée spontanée).

Conclusion

Les plantes du genre *Hedysarum*, comme toute les plantes cultivées, peuvent être affectées par des maladies d'origine cryptogamique, bactériennes ou virales. La reconnaissance de ces agents pathogènes est très indispensable pour gérer convenablement la culture et la lutte contre ces ennemies. Plusieurs maladies attaquant les cultures fourragères, surtout virales ou bactériennes, peuvent causer des dégâts énormes sur les légumineuses.

Etant réalisé pour la première fois dans ces éventuelles conditions, ce travail nécessite une continuité et un approfondissement pour chercher d'autres maladies et agents pathogènes nuisant la culture du sulla dans la région, dans le but de prévenir et/ou lutter contre ces ennemies afin d'avoir une production fourragère satisfaisante.

Les 3 espèces d'*Hedysarum* semblent toutes sensibles à l'attaque par le *Phytophthora*, agent de la pourriture racinaire, mais *H. carnosum* présente une sensibilité plus élevée que les autres.

Pour lutter contre les maladies existantes dans les sols de la région, on doit **i)** diversifier les espèces à cultiver dans la rotation culturale pour casser la chaîne de la propagation de l'agent pathogène, **ii)** ajouter d'autres espèces du sulla ou écotypes pour trouver des sources de résistance, et, **iii)** exploiter les espèces résistantes comme source de gène de résistance en cas de création variétale des espèces et/ou variétés résistantes à la haute pathogénicité de ces agents...

Tout cela avant d'y arriver à l'utilisation des traitements phytosanitaires.

**CONCLUSION
GÉNÉRALE
ET
PERSPECTIVES**

CONCLUSION GENERALE et PERSPECTIVES

La réussite des systèmes de production agricole dans le monde repose sur des méthodes et des approches systémiques efficaces et durables qui valorisent les bio-ressources génétiques locales, végétales ou animales, en prenant en considération les caractéristiques édaphiques, climatiques et environnementales de la région d'étude.

La production fourragère et la production animale sont des secteurs très reliés et jouent un rôle primordial dans le secteur agricole. Une réussite signalée dans le créneau fourrager est systématiquement une réussite acquise pour l'élevage et pour la production animale de point de vue quantitative (lait, viande, laine,...) et qualitative (santé animale).

L'Algérie est riche en phyto-ressources naturelles et en espèces des légumineuses qui peuvent être utilisées comme fourrage, vivaces ou annuelles: trèfle, mélilot, luzerne, vesce..., et peuvent assurer et améliorer l'autonomie protéique du cheptel, mais malheureusement les agriculteurs et les responsables ont toujours une tendance vers l'importation des semences traitées, malgré ses conséquences négatives sur le plan économique, agronomique, social et sanitaire.

Les travaux menés au cours de cette étude de quelques espèces fourragères jugées très intéressantes présentant des traits agronomiques importants, riche en éléments nutritives, très appréciée par les herbivores et bénéfiques pour les sols cultivés, *Hedysarum* sp., nous ont permis d'annoncer l'aptitude très élevée de ces espèces à l'adaptation dans les zones marginales et sous des condition édaphiques et climatiques très difficiles, à condition qu'ils soient irrigués. La chose qui va nous encourager à la généralisation des résultats obtenus dans le but d'élargir sa culture chez les agriculteurs-éleveurs et d'enrichir le calendrier fourrager qui reste limité sur la culture de la luzerne (*Medicago sativa*) et quelques espèces des graminées à faible valeur protéique.

Sur le plan de l'introduction des espèces du sulla dans la région, notre étude confirme la possibilité de choisir une gamme des espèces de *Hedysarum* pour les développer dans nos systèmes de culture. Ainsi, cette étude a démontré l'existence d'une grande variabilité morphologique, agronomique et fonctionnelle qui pourrait servir à obtenir des variétés hybrides à hauts rendements fourragers sous les conditions des Oasis algériennes (froid, stress salin, stress hydrique...).

Dans cet objectif, un ensemble d'expérimentations ont été installé sur le terrain pour prouver quelques caractéristiques des espèces d'*Hedysarum*: des compagnes de prospection des semences et

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

des échantillons du sol ont été effectuées durant les campagnes de 2017, 2018, 2019 et 2020 à travers quelques régions du nord : Sétif, Biskra, El-Tarf, Tizi-Ouzou, Béjaïa...

La caractérisation agronomique des trois espèces du sulla montre que *H. carnosum* présente un bon démarrage et une meilleure vitesse de croissance et de développement par rapport aux autres espèces; cela revient à la ressemblance des conditions de la région d'origine de l'espèce et celles de la région d'étude. En termes de la hauteur des plantes, la valeur la plus faible est enregistrée sur *H. carnosum* avec une hauteur de 38,29 cm suivi par *H. flexuosum* avec une hauteur de 67,16 cm et finalement la hauteur la plus élevée est donnée par *H. coronarium* avec 69,23 cm de hauteur. En général, toutes les espèces ont manifesté une possibilité de croissance et du développement dans la région d'étude.

Pour le rapport feuilles-tiges, qui représente un indice très intéressant pour la qualité des fourrages, les résultats obtenus sont fortement similaires à ceux enregistrés chez ces espèces dans les habitats naturels. Les espèces cultivées montrent des valeurs très proches de ce rapport; donc pas de différence significative ($p > 0,05$): 1,25 ; 1,40 et 1,44 pour *H. coronarium*, *H. flexuosum* et *H. carnosum* respectivement.

La surface foliaire spécifique représente une référence fonctionnelle expliquant l'aptitude à l'adaptation et à la production d'une espèce végétale donnée. Malgré la présence de la salinité dans le sol cultivé, ce paramètre n'est pas affecté. Le maximum de SLA est observé chez les deux espèces cultivées *Hedysarum coronarium* et *Hedysarum carnosum* qui ont pratiquement enregistrées des valeurs égales avec des moyennes de 13,075 et 13,088 m²/kg respectivement. La différence entre la valeur la plus élevée et la valeur la plus faible représente un pourcentage de 47,04%. L'eau se trouve dans la composition des feuilles avec une teneur de 83,04%.

La nutrition azotée est assurée par une fertilisation azotée à travers des engrais synthétiques. Les doses les plus productives qui ont donné des bons résultats sont D2 et D3 (25 et 37 unités de N); mais de point de vue économique, cultural et environnemental, la dose D2 est la plus préférée. Elle a donné des résultats satisfaisants de croissance et de production pour les espèces et les écotypes. Cette dose a enregistré la médiane la plus importante en rendement en matière sèche par rapport aux autres traitements (un rendement de 3,1 t/ha est donné par la population de Sétif).

L'évaluation de la possibilité d'avoir des nodules au niveau des racines des plantes par une inoculation indirecte a manifesté des bons résultats. *Hedysarum flexuosum* a présenté une aptitude à former un nombre très élevé de nodules dans les trois types du sol utilisés; et le sol de Sétif renferme le rhizobium spécifique pour les trois espèces d'*Hedysarum* cultivées; il a donné des résultats très

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

satisfaisants sur le plan du nombre de nodules pour toutes les espèces cultivées (116 ; 115,3 ; 105,67 nodules) surtout pour *Hedysarum flexuosum* et *Hedysarum coronarium*.

En ce qui concerne la composition chimique des espèces cultivées du sulla dans la région d'étude, nous avons constaté que ses valeurs n'ont pas marqué des différences entre les espèces spontanées naturelles et les espèces cultivées dans cette nouvelle région marginale, ils n'ont pas subis des changements, ni des pertes de qualité. Elles ont préservé des quantités similaires en protéines, en cellulose brute, en polyphénols et en tannins condensés... ces caractéristiques vont assurer et garantir une palatabilité vis-à-vis les animaux d'élevage, tout en évitant les problèmes gastriques graves connus dans le domaine de zootechnie tel que le ballonnement et la météorisation.

Les résultats de l'étude de la composition chimique des trois espèces du *Hedysarum* confirment la contenance des teneurs intéressantes en protéines brutes. *Hedysarum carnosum* a enregistré la valeur la plus élevée qui est de 20,87%, par rapport aux autres espèces qui ont des valeurs très proches (17,43% pour *H. flexuosum* et 17,19% pour *H. coronarium*). La teneur en cellulose brute est très élevée chez *H. coronarium* (18,49%), moyenne chez *H. carnosum* (10,02%) et faible chez *H. flexuosum* (7,76%); cela revient probablement au rapport feuilles sur tiges qui a une influence directe sur ce paramètre. Sachant qu'un meilleur fourrage doit avoir une teneur faible en cette matière. Pour les flavonoïdes, les valeurs obtenues sont modérées (1,39% à 2,32%), et un fourrage qui contient une concentration de flavonoïdes entre 2 et 4% de MS peut avoir des effets bénéfiques sur le métabolisme des protéines chez les ruminants.

Donc, les espèces du sulla présentent des caractéristiques agronomiques très prometteuses et de bonnes qualités, elles peuvent participer à l'amélioration du calendrier fourrager à côté de la luzerne, surtout au moment de sa dormance. En plus, si elles sont cultivées en association avec d'autres espèces fourragères graminées ou fabacées, les résultats seront certainement plus rentables.

La précocité du cycle des espèces et des populations de sulla en milieu aride semble être un caractère très bénéfique et déterminant dans la performance des rendements, surtout le nombre de coupes qui va être élevé, en plus à d'autres caractéristiques importantes à savoir ; le rendement semencier et la qualité nutritive et fourragère.

Les espèces du sulla sont connues par leur rôle mellifère. Elles peuvent contribuer à l'élevage apicole, en offrant des plantes riches en nectar de haute qualité. On a constaté l'existence des productions du miel à base des fleurs du sulla (miel du sulla) au niveau du marché national et international. Les espèces du sulla possèdent des fleurs vives attirant de loin les butineuses, et leur

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

floraison s'étale sur une bonne période de l'année connu critique, vu l'absence des autres espèces mellifères en cette dernière.

Au terme d'aptitude du sulla à la nodulation, nous avons arrivé à des résultats intéressants et encourageants sur la possibilité de la production des nodules (soit directement ou indirectement) chez les plantes cultivées, et par la suite, une prévision d'une production élevée en fourrage (matière végétale fraîche et matière végétale sèche) et en protéines (MAT), sans oublier les rôles écologiques et économiques recueillis de cette association qui sont la restitution de l'azote dans le sol et la minimisation de l'utilisation des engrais chimiques. Une variabilité de la productivité des plantes hôtes a été observée en relation avec l'environnement physique, et la population rhizobiale non-autochtone en symbiose (ramenée du nord).

Les agriculteurs doivent assurer un strict minimum de prévention et lutte contre les ennemies de cultures pour arriver à des fourrages de haut potentiel fourrager indemne de maladies, ainsi pour garantir la production de fourrage en vert, en contrôlant les bio-agresseurs, les identifier, les combattre par des méthodes appropriées. L'application des alternatives de bio-pesticides contre les ravageurs et les maladies du sulla est une nécessité indispensable pour préserver l'écosystème oasien et saharien.

Si on parle de la génétique ou de la biotechnologie végétale, la recherche des gènes d'intérêt est très indispensable pour l'amélioration de la performance des espèces cultivées, et les incorporer dans leur génome adapté aux conditions de la région, soit par des hybridations artificielles ou bien par des manipulations génétiques saines.

Enfin, le présent travail vise dans son ensemble l'installation des cultures du sulla stables et diversifiés, sur des agrosystèmes fortement fragilisés, doit être réfléchi en amont avec des études portant sur les espèces cultivées, la microflore et les amendements visant à corriger les paramètres physico-chimiques du sol pour faciliter l'installation des sulla et de leurs microsymbiotes bactériens et mycorhiziens (en cas d'existence).

PERSPECTIVES

A la fin de ce travail, et pour le valoriser, il est recommandé d'éclairer beaucoup d'autres points par d'autres travaux de recherche et d'autres investigations sur le terrain, afin de construire une banque de données spécifiques qui concernent les différents composantes de l'étude: productions fourragères, espèces du genre *Hedysarum*, caractéristiques de la régions... et par la suite, partager

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

ces informations et ces applications avec les agriculteurs investisseurs ainsi que les responsables locaux et au niveau régional et national.

Dans une perspective future, il serait intéressant de poursuivre ce travail par un ensemble de paramètres à détailler, à savoir :

- ✓ Élargissement de la culture des espèces d'*Hedysarum* en intensive sous pivot: Guerrara, El-Meniaa... et l'évaluation du nombre de coupes par an.
- ✓ Cultiver le sulla en association avec d'autres espèces (graminées ou fabacées) pour bénéficier des avantages des deux espèces; la précocité, le chevauchement dans le temps, addition de la valeur nutritive, protection mutuelle contre les aléas climatiques...
- ✓ La détermination des besoins des plantes en phosphore et en potassium, et en eau d'irrigation (doses et fréquences).
- ✓ Réaliser des essais d'inoculation à grande échelle, et comparer la production fourragère entre les différentes méthodes : inoculation directe ou indirecte, fertilisation minérale, amendement organique.
- ✓ L'amplification de la production semencière issue de la région (ces semences auront une adaptation préliminaire) pour assurer une large diffusion du matériel biologique auprès des agriculteurs.
- ✓ Tester la résistance de ces espèces contre les stressés abiotiques: salinité, sécheresse...

L'importance de mener d'autres investigations et/ou expérimentations plus poussées réside sur le fait que ce genre d'études est indispensable pour le développement et l'amélioration de la production fourragère en quantité et en qualité, tout en préservant l'équilibre de l'écosystème oasien et saharien, ainsi que les ressources hydriques.

RÉFÉRENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abdelguerfi, A., 1987. Situation des fourrages en Algérie. **Céréaliculture** 16 : 1-5.
- 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 de Doctorat, INA, El-Harrach, Alger. 431p.
- Abdelguerfi A. et Laouar M., 2003. Situation et possibilités de développement des productions fourragères et pastorales en Algérie. In "Actes de l'Atelier National sur la Stratégie de développement des Cultures Fourragères en Algérie", Alger 10-11 juin 2001. pp. 36-48.
- Abdelguerfi-Berrekia R., Abdelguerfi A., Bounaga N., Guittonneau G.G., 1988. Contribution à l'étude des espèces spontanées du genre *Hedysarum* L. en Algérie. Etude auto-écologique. **Annales de l'INA El-Harrach**. 12 : 191-219.
- Abdelguerfi-Berrekia R., Abdelguerfi A., Bounaga N., Guittonneau G.G., 1991. Répartition des espèces spontanées du genre *Hedysarum* selon certains facteurs du milieu en Algérie. **Fourrages** 126 : 187-207.
- Achichi I., Slimani A., Ghamri A.N., Semmar M.F., 2021. Effet des fréquences de fauche sur la morphologie et la production de biomasse de populations naturelles de *Sulla coronaria* (L.) en région montagneuse du nord-est de l'Algérie. **Fourrages** 248 : 57-62.
- Aerts R.J., Barry T.N., McNabb W.C., 1999. Polyphenols and agriculture: Beneficial effects of proanthocyanidins in forages. **Agric. Ecosyst. Environ.** 75 : 1-12.
- Aissa A., Manolaraki F., Ben Salem H., Hoste H., Kraiem K., 2016. In vitro assessment of the anthelmintic activity of *Hedysarum carnosum* Desf. at different phenological stages and from six locations in Tunisia. **Parasitology**, 143(06) : 778-786.
- Alexander J.S., Walter H.S., Lowell E.M., 2001. Predicting Leaf/Stem Ratio and Nutritive Value in Grazed and Nongrazed Big Bluestem. **Agron. J.** 93 : 1243-1249.
- Amrani O., 2021. Etude floristique et nutritive, spatiotemporelles, des principales plantes vivaces des parcours steppiques, naturels et aménagés, de la région de Laghouat. Thèse de Doctorat des sciences, Université Kasdi Merbah – Ouargla, Algérie. 189p.
- Annicchiarico P., Abdelguerfi A., Ben Younes M., Bouzerzour H., Carroni A. M., Pecetti L., Tibaoui G., 2008. Adaptation of *sulla* cultivars to contrasting Mediterranean environments. **Australian Journal of Agricultural Research** 59 : 702-706.
- Ardenne C., 2017. Bulletin de santé du végétal. **Ecophyt** 24 : 1-16.
- Atanu Kumar Das A., Nazrul I. Md., Faruk Md. O., Ashaduzzaman Md., Dungani R., 2020. Review on tannins: Extraction processes, applications and possibilities. **South African Journal of Botany** 135 : 58-70.
- Aufrere J., Theodoridou K., Baumont R., 2012. Valeur alimentaire pour les ruminants des légumineuses contenant des tannins condensés en milieux tempérés. **INRA Prod. Anim.** 25 (1) : 29-44
- Azib S., 2020. La symbiose rhizobium-luzerne : étude de la diversité rhizobiale et essais d'inoculation en vue d'améliorer les rendements en fourrage dans le Sahara septentrional est-algérien. Thèse de Doctorat ès sciences, Université Kasdi Merbah – Ouargla, Algérie. 143p.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bareille N., Haurat M., Delaby L., Michel L., Guatteo R., 2019. Quels sont les avantages et risques du pâturage vis-à-vis de la santé des bovins? **Fourrages** 238 : 125-131.
- Battandier J.A. et Trabut, 1888. Flore de l'Algérie : ancienne flore d'Alger transformée. Typographie Adolphe Jourdan, imprimeur-libraire-éditeur, Paris-France, librairie f. Savy 77, 825p.
- Baugnée J.Y., Drumont A., Fagot J., Ignace D., 2021. *Bruchidius imbricornis* (Panzer, 1795), *Bruchus occidentalis* Lukjanovitch et Ter-Minassian, 1957 et *Bruchus brachialis* Fåhræus, 1839 nouveaux pour la faune belge et données récentes de *Bruchidius siliquastri* Delobel, 2007 (Coleoptera: Chrysomelidae, Bruchinae). **Bulletin de la Société royale belge d'Entomologie** 157 : 34-53.
- Baumont R., Aufrère J., Meschy F., 2009. La valeur alimentaire des fourrages : rôle des pratiques de culture, de récolte et de conservation. **Fourrage** 198 : 153-173.
- Ben Abdallah H., Jörg Mai H., Slatni T., Fink-Straube C., Abdelly Ch., Bauer P., 2018. Natural Variation in Physiological Responses of Tunisian *Hedysarum carnosum* Under Iron Deficiency. **Front. Plant Sci.**, vol. 9 : pp 1-11.
- Ben Fadhel N., Afif M., Boussaïd M., 2006. Structuration de la diversité génétique de *Hedysarum flexuosum* en Algérie et au Maroc. Implications sur sa conservation. **Fourrages** 186 : 229-240.
- Ben Fadhel N., Boussaïd M., Manakchi M., 1997. Variabilité morphologique et isoenzymatique de populations naturelles maghrébines d'*Hedysarum flexuosum* L. **Al-Awamia** 96 : 77-90.
- Ben Fadhel N., Zaouali Y., Boussaid M. 2000. Aptitudes de deux légumineuses pastorales *Hedysarum carnosum* Desf. et *Argyrolobium uniflorum* Jaub. et Spach. à la réhabilitation des parcours en milieu aride de la Tunisie. In : Sulas L. (ed.). Legumes for Mediterranean forage crops, pastures and alternative uses . Zaragoza : CIHEAM (**Cahiers Options Méditerranéennes**; n. 45) p. 95-98.
- Ben Jeddi F., 2005. *Hedysarum coronarium* L. : Variation génétique, création variétale et place dans les rotations tunisiennes. Thèse de Doctorat en sciences biologiques appliquées. Faculté des sciences en bio-ingénierie. Université de Gen Belgique. 216 p.
- Ben Moussa M-T., Amine Cherif R., Lekhal S., Bounab A., Hadeif Y., 2022. Dosage des composés phénoliques et détermination de l'activité antioxydante des extraits méthanoliques de *Brocchia cinerea* VIS de l'Algérie (Sud-Est). **Algerian journal of pharmacy** Vol. 04 Num. 01 : 49–59.
- Ben Rayana A., 2014. Catalogue des obtentions végétales et des brevets. Ed. IRESA (Institution de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur Agricoles), Tunisie, 58p.
- Ben Tamallah S., 1987. En zone sub-humide tunisienne, intérêt de l'association avoine-sulla (*Hedysarum coronarium*) ; premiers résultats. **Fourrages** 109 : 41-52.
- Benhizia H., Benhizia Y., Djeghar R., Pustahija F., Siljak-Yakovlev S, Khalfallah N., 2020. Cytogenetic characterization, nuclear genome size, and pollen morphology of some *Hedysarum* L. Taxa (*Fabaceae*) from Algeria, with emphasis on the origin of *H. perrauderianum* Coss. and Durieu. **Genet Resour Crop Evol**, Vol 5 : 231-241. <https://doi.org/10.1007/s10722-020-01016-0>
- Benyoussef S., Abidi S, Khalfallah G., Zehani M.S., Zoghلامي-Khelil A. et Ben Salem H., 2016. Nutritional and anti-nutritional characterization of six Tunisian local forage legumes

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- species. CIHEAM (*Options Méditerranéennes* : Série A. Séminaires Méditerranéens; n. 114) : 221-224
- Bouajila K., Ben Jeddi F., Sanaa M., 2013. Valorisation des terres en pente par le sulla du nord (*Hedysarum coronarium* L.) en condition de semis direct et conventionnel. *Journal of Agriculture and Environment for International Development* 107 (1) : 33-43.
 - Bouzekri M., Daoudi-Hacini S., Cagniant H., et Doumandji S.E., 2015. Étude comparative des associations (plantes-fourmis) dans une région steppique (cas de la région de Djelfa, Algérie). *Lebanese Science Journal* 16, N°1 : 69-77.
 - Briat J. F. et Job D., 2017. Les sols et la vie souterraine: Des enjeux majeurs en agroécologie. Ed. Quae, France. 329p.
 - Brown L.M et Anand M., 2022. Plant functional traits as measures of ecosystem service provision. *Ecosphere* 13 (2) : 1-13. e3930. <https://doi.org/10.1002/ecs2.3930>
 - Brunel B., Domergue O., Maure L., Brahic P., Galiana A., Josa R., De Lajudie P., Attallah T., Risk H., El-Hajj S., Cleyet-Marel J.-C., 2007. Potentialité des associations symbiotiques plantes–micro-organismes pour réhabiliter des sites fortement dégradés en milieu méditerranéen. *Cahiers Agricultures* vol. 16, n° 4 : 324-329.
 - Bullita S., Bullitta P., Saba P., 2000. Seed production and its components in Sardinian germplasm of *Hedysarum coronarium* L. and *H. spinosissimum* L. CIHEAM. *Cahiers Options Méditerranéennes* n° 45 : 355-358.
 - Carpéné M.-A., 2013. Purification et caractérisation de signaux biologiques à l'état de traces. Thèse de Doctorat des sciences en Chimie-Biologie-Santé. Université Toulouse III - Paul Sabatier – France. 188p.
 - Casella S., Gault R. R., Reynolds K. C., Dyson J. R., Brockwell J. 1984. Nodulation studies on legumes exotic to Australia (*Hedysarum coronarium* L.). *FEMS Microbiol. Letters* 22: 37- 45.
 - Chaabena A., Abdelguerfi A., Eddoud A., Chehma A., Babahani S., Bradai L., Benamor O., Souta H., Rahmani A., Benhania A., Bouziani I., Maamri K., Touati A., Trabelsi H., Achour L., 2006. Importance des fabacées dans la flore Saharienne. Cas des régions de Ouargla et de Oued Righ. Workshop International sur "Diversité des Fabacées fourragères et de leurs symbiotes: Applications biotechnologiques, agronomiques et environnementales". Alger, 19-22 février 2006. 5p.
 - Chabouni A., Issolah R., Benabdelkader E., Tahar A., 2019. Comportement de quelques populations oasiennes de luzerne pérenne (*Medicago sativa* L.) dans une zone hyper-aride du sud de l'Algérie. *Fourrages* 238 : 181-187.
 - Chahbar N., Belzunces L.P., Doumandji S., 2011. Effet d'un insecticide utilisé en protection des végétaux: thiamethoxam sur l'abeille saharienne *Apis mellifera sahariensis*. *Algerian journal of arid environment* vol. 1, n° 2 : 11-21.
 - Chalmandrier L., 2008. Conservatisme phylogénétique des traits fonctionnels végétaux. Un test utilisant un échantillon de la Flore Alpine. *Rapport de stage*, Laboratoire d'Écologie Alpine, 31p.
 - Chehma A., 2005. Etude floristique et nutritive des parcours camelins du Sahara septentrional algérien Cas des régions d'Ouargla et Ghardaïa. Thèse Doctorat, Université Badji Mokhtar, Annaba, 147 p.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Chengyou C., Ying Z., Zhenbo C., Shuwei F., Tingting W., Qing R., 2017. Soil bacterial community responses to revegetation of moving sand dune in semi-arid grassland. **Appl Microbiol Biotechnol.** (12p) DOI 10.1007/s00253-017-8336-z
- Chennaoui-Kourda H., Marghali S., Marrakchi M., Trifi-Farah N., 2007. Genetic diversity of Sulla genus (*Hedysarea*) and related species using Inter-simple Sequence Repeat (ISSR) markers. **Biochemical Systematics and Ecolog.**, 35: 682 – 688.
- Chennaoui-Kourda H., Marghali S., Zitouna N., Trifi-Farah N., 2012. Phylogenetic relationships of Mediterranean *Hedysarea* species assessed by AFLP markers. **Plant Syst. Evol.** 298 : 51-58.
- Choi B-H, Ohashi H., 2003. Generic Criteria and an Infrageneric System for *Hedysarum* and Related Genera (Papilionoideae-Leguminosae). **Taxon**, Vol. 52, No. 3 : 567-576.
- Christian P., Strullu D.G., 1995. L'intérêt des mycorhizes. Cultures légumières : 19-22.
- Come D. et Semadeni A. , 1973. Dégazage des enveloppes séminales lors de leur imbibition. III. Application à l'étude de la dureté des graines d'*Hedysarum coronarium* L. **Physiol, vég.**, 11 : 171-179.
- Cronk Q., Ojeda I., et Pennington R. T., 2006. Legume comparative genomics: progress in phylogenetics and phylogenomics. **Current Opinion in Plant Biology** 9 : 99-103
- Delobel B., Delobel A., 2003. Les plantes hôtes des bruches (*Coleoptera Bruchidae*) de la faune de France, une analyse critique. In: **Bulletin mensuel de la Société linnéenne de Lyon**, 72^{ème} année, n°6, 199-221 <https://doi.org/10.3406/linly.2003.13471>
- Demarquilly C., 1970. Influence de la fertilisation azotée sur la valeur des fourrages verts. **Annales de Zootechnie** 19, 423-437.
- Denaiffe C., Denaiffe H., 1896. Manuel pratique de culture fourragère. Ed. **librairie J.B. Baillière**. Paris – France. 384 p.
- Djemaa-Landri K., Hamri-Zeghichi S., Belkhiri-Beder W., Krisa S., Cluzet S., Richard T., Valls J., Kadri N., Madani K., 2021. Phenolic content, antioxidant and anti-inflammatory activities of some Algerian olive stone extracts obtained by conventional solvent and microwave assisted extractions under optimized conditions. **Journal of Food Measurement and Characterization** 15 : 4166–418 <https://doi.org/10.1007/s11694-021-00992-w>
- Djeridane A., Yousfi M., Nadjemi B., Boutassouna D., Stocker P., Vidal N., 2006. Antioxidant activity of some algerian medicinal plants extracts containing phenolic compounds. **Food Chemistry** 97 : 654–660 doi:10.1016/j.foodchem.2005.04.028
- Dong Y.-M., Tang D., Zhang N., Li Y., Zhang C., Li L., Li M.-H., 2013. Phytochemicals and biological studies of plants in genus *Hedysarum*. **Chem. Cent. J.**, 7: 124-136. doi: 10.1186/1752-153X-7-124
- Douglas G.B., 1984. Seed production of Sulla - A plant for soil conservation. **Proceedings of the New Zealand Grassland Association** 45 : 239-242.
- Douglas G.B., Keogh R.G., Foote A.G., 1998. Development of sula (*Hedysarum coronarium*) for better adaptation to grazing. **Proceedings of the New Zealand Grassland Association** 60 : 173-179.
- Easlon H.M. et Bloom A.J., 2014. Easy leaf area: Automated digital image analysis for rapid and accurate measurement of leaf area. **Applications in Plant Sciences** 2 (7) : 1-4.
- Elyemlahi A., Arakrak A., Laglaoui A., Bakkali M., 2017. Diversity and Efficiency of Rhizobia Nodulating *Hedysarum flexuosum* L. in Northwestern of Morocco in Relation to

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Soil Properties. || Kumar, Vivek; Kumar, Manoj; Sharma, Shivesh; Prasad, Ram (2017). ***Probiotics and Plant Health (Chapter 8)***, 201–213. doi:10.1007/978-981-10-3473-2_8
- El Yemlahi A., Arakrak A., Laglaoui A., Ayadi M., Bakkali M., 2019. Nutritional evaluation of *Sulla* (*Hedysarum flexuosum* L.) ecotypes grown in Northwest region of Morocco. ***Moroccan Journal of Biology*** 16 : 19–29.
 - El Yemlahi A., Arakrak A., Laglaoui A., Ayadi M., Bakkali M., 2022. Potential contribution of *Sulla spinosissima* (L.) and *Sulla pallida* (Desf.) as a forage crop for arid pastures rehabilitation. Research Square : 1–14 DOI: [10.21203/rs.3.rs-2399112/v1](https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2399112/v1)
 - Errassi A., Ayadi M., Chabbi M., Jaber A., 2018. In vitro digestibility and gas production characteristics of *Hedysarum flexuosum* ecotypes from Northwestern Morocco. ***Journal of Materials and Environmental Sciences***. Volume 9, Issue 7 : 1942–1949.
 - Exilien R., 2020. Dynamics of yellow aphid infestation (*Melanaphis sacchari*) on sorghum and selection of potential biological control agent against *M. sacchari*. ***Pilot project report***, Faculté d'Agronomie et de Médecine Vétérinaire (FAMV). 33p.
 - Ezzakkioui F., El Mourabit N., Chahboune R., Castellano-Hinojosa A., Bedmar E., Barrijal S., 2015. Phenotypic and genetic characterization of rhizobia isolated from *Hedysarum flexuosum* in Northwest region of Morocco. ***Journal of basic microbiology*** 55: 1–8.
 - Fetch T., Mitchell Fetch J., Zegeye T., Xue A., 2020. Races of *Puccinia graminis* on barley, oat, and wheat in Canada from 2015 to 2019. ***Canadian Journal of Plant Pathology***. Volume 43, Issue 3 : 463–471 doi:10.1080/07060661.2020.1829066
 - Fitouri D-S., 2011. Diversités phénotypique et Moléculaire des microsymbiotes du *Sulla* du Nord (*Hedysarum coronarium* L.) et sélection de souches rhizobiales efficaces. Thèse de Doctorat en sciences agronomiques. Institut national agronomique de Tunisie. 145p.
 - Fitouri D-S., Ben Jeddi F., Zribi K., Rezgui S., Mhamdi R., 2012. Effet de l'inoculation par une souche osmotolérante de *Rhizobium sullae* sur la croissance et la production en protéine du *Sulla* (*Sulla coronarium* L.) sous déficit hydrique. ***Journal of Applied Biosciences*** 51: 3642-3651.
 - Fitouri S-D, Trabelsi D., Saïdi S., Zribi K., Ben Jeddi F., Mhamdi R., 2012. Diversity of rhizobia nodulating *sulla* (*Hedysarum coronarium* L.) and selection of inoculant strains for semi-arid Tunisia. ***Ann Microbiol*** 62 : 77–84 DOI [10.1007/s13213-011-0229-2](https://doi.org/10.1007/s13213-011-0229-2)
 - Foster K., 2006. *Sulla* (*Hedysarum coronarium* L.). Department of Agriculture and Food Western Australia, Bulletin 4690, Perth.
 - Fritzner P., 2022. Plan de manejo de la roya del sorgo (*Puccinia purpurea*, Cooke). ***MATS – Clase de Protección Vegetal***. 1-15 DOI: [10.13140/RG.2.2.10768.07683](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.10768.07683)
 - Gachet J. P., Jaritz G., 1972. Situation et perspectives de la production fourragère en culture sèche en Tunisie septentrionale. ***Fourrages*** 49 : 3-24.
 - Garnier E., Shipley B., Roumet C., Laurent G., 2001. A standardized protocol for the determination of specific leaf area and leaf dry matter content. ***Funct. Ecol.***, 15 : 688-695.
 - Gehlot H. S., Panwar D., Tak N., Tak A., Sankhla I. S., Poonar N., ... Sprent, J. I., 2012. Nodulation of legumes from the Thar desert of India and molecular characterization of their rhizobia. ***Plant and Soil*** 357(1-2) : 227–243 <http://dx.doi.org/10.1007/s11104-012-1143-5>
 - Ghahari H., Borowiec L., 2017. A checklist of seed-beetles (Coleoptera: Chrysomelidae: Bruchinae) from Iran. ***Zootaxa*** 4268 (2) : 215-237 <https://doi.org/10.11646/zootaxa.4268.2.3>

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Gomide C., Chaves C. S., Ribeiro K.G., Sollenberger L.E., Paciullo D., Pereira T., Morenz M., 2014. Structural traits of elephant grass (*Pennisetum purpureum* Schum.) genotypes under rotational stocking strategies. *African Journal of Range and Forage Science* 31 : 1-7. DOI:10.2989/10220119.2014.930929
- Guerin H., 1999. Valeur alimentaire des fourrages cultivés. *In* : Roberge G., Toutain B., 1999. Cultures fourragères tropicales. **Book chapter**. Ed. CIRAD Repères – Montpellier. 55p.
- Hamrit S., 1995. Situation des fourrages en Algérie. *Al-Awamia* 89 : 97-108.
- Hanson EM., Maxwell DP., 1991. Species of *Phytophthora megasperma* complex. *Mycologia* 83 : 376–381.
- Hassen H., Zoghلامي-Khelil A., Ben Salem H., 2016. CHATRA : variété population de sulla du nord inscrite en 2009.
- Hennouni N., Djebar M.R., Berrebbah H. D., 2012. Effect of systemic fungicide (combination of Cyproconazole and Propiconazole) newly introduced in Algeria on Septoria of two varieties of wheat (*Triticum durum* Desf). *Advances in Environmental Biology* 6 (4) : 1433-1441.
- Hodgson J.G., Montserrat-Martí G., Charles M., Jones G., Wilson P., Shipley B. Sharafi M., Cerabolini B. E. L., Cornelissen J. H. C., Band S. R., Bogard A., Castro-Díez P., Guerrero-Campo J., Palmer C., Pe´rez-Rontome´ M. C., Carter G., Hynd A., Romo-Díez A., de Torres Espuny L., Royo Pla F., 2011. «Is leaf dry matter content a better predictor of soil fertility than specific leaf area?» *Annals of Botany* 108 : 1337-1345.
- Homrani Bakali A., 2019. <https://www.teline.fr/fr/photos/fabaceae/hedysarum-flexuosum#photo-7> . Consulté le 17/11/2020.
- Houari K.D., Chehma A., 2007. Variation temporelle de la valeur nutritive des principales plantes spontanées broutées par le dromadaire dans le sud est algérien. *Annales de la faculté des sciences et sciences de l'ingénieur*, Université de Ouargla, Vol. 1, N° 2 : 33-35.
- Hussain I., Sanglard M., Bridson J. H. , Parker K., 2020. Preparation and physicochemical characterisation of polyurethane foams prepared using hydroxybutylated condensed tannins as a polyol source. *Industrial Crops and Products* 154 : 1-8.
- International Legume Database and Information Service (ILDIS), 2010. The Euro+Med PlantBase - the information resource for Euro-Mediterranean plant diversity.
- Ionac N., Grigore E., Constantin D.M., 2015. Évaluation des phénomènes de dessèchement et de sécheresse dans la zone continentale du plateau de la Dobroudja du sud. XXVIIIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Liège. 6p.
- Issolah R., 2012. Synthèse de travaux réalisés sur certaines espèces appartenant aux genres *Trifolium* L. et *Hedysarum* L. (Fabaceae) en Algérie. *Rev. Recherche agronomique* 25 : 7-23.
- Issolah R., Khalfallah N., 2010. Variation of the bloom and fruiting within fourteen Algerian populations of Sulla. CIHEAM / CIBIO / FAO / SEEP. *Options Méditerranéennes : Série A. Séminaires Méditerranéens* n° 92 : 135-138.
- Issolah R., Yahiaoui S., 2008. Phenological variation within several Algerian populations of Sulla (*Hedysarum coronarium* L., Fabaceae). *CIHEAM; Options Méditerranéennes: Série A. Séminaires Méditerranéens* 79 : 385-388.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Issolah R., Tahar A., Derbal N., Zidoun F., Ait Meziane M-Z., Oussadi A., Dehiles I., Bradai R., Ailane M., Terki N., Aziez F., Zouahra A., Djellal L., 2012. Caractérisation écologique de l'habitat naturel du Sulla (Fabaceae) dans le nord-est de l'Algérie. **Rev. Écol. (Terre Vie)**, vol. 67 : 295-304.
- Issolah R., Tahar A., Sadi S., Adjabi M., Chellig-Siziani Y., Yahiatene S., Lebied M., 2014. Analysis of the growth and the chemical composition within some Algerian populations of Sulla. **Journal of Biological Sciences** 14 (3) : 220-225.
- James R.N., Maurice J.T., Catherine A.T., Robert G.H., 1983. Environmental Regulation of Dormancy in the Alfalfa Blotch Leafminer, *Agromyza frontella* (Diptera: Agromyzidae). **Ann .Entomol. Soc. Am.** 76 : 116-119.
- Janati A., 1990. Les cultures fourragères dans les oasis. **Options méditerranéennes**, série A. N° 11 : 163-169.
- Julier B. et Huyghe C., 2010. Quelles légumineuses fourragères (espèces et variétés) et quelles conduites pour améliorer l'autonomie protéique des élevages herbivores ? INRA France. 25p.
- Kadi S.A., Guermah H., Bannelier C., Berchiche M., Gidenne T., 2011. Nutritive value of sun-dried sulla hay (*Hedysarum flexuosum*) and its effect on performance and carcass characteristics of growing rabbits. **World Rabbit Sci.** 19 : 151 – 159.
- Kadi S.A., Guermah H., Mouhous A., Djellal F., Berchiche M., 2015. *Sulla flexuosa* (*Hedysarum flexuosum*) : an not well-known forage legume of the mediterranean coast. V meeting of the Spanish association for legumes AEL, (V JORNADAS DE LA AEL) : 127-128.
- Khédija Bouajila Kh., Ben Jeddi F., Sanaa M., 2014. Effet de la décomposition des résidus de sulla (*Hedysarum coronarium* L.) sur l'évolution des caractéristiques chimiques de deux types de sol en climat aride Tunisien. **J. Mater. Environ. Sci.** 5 (3) : 723-730
- Kheloufi A. et Mansouri L. M., 2017. Effet de l'acide sulfurique sur la germination d'un arbre fourrager *Acacia nilotica* (L.) subsp *tomentosa*. **Livestock Research for Rural Development** 29 (2) : ND.
- Klein H. D., 1999. Critères de choix et classements des légumineuses introduites dans les systèmes agropastoraux intertropicaux pour le développement d'une agriculture durable. In "Actes de l'atelier international sur la gestion agrobiologique des sols et des systèmes de culture, Madagascar. pp. 195-212.
- Klein H.D., Rippstein G., Huguenin J., Toutain B., Guerin H., Louppe D., 2014. Les cultures fourragères. Ed. **Quæ, CTA, Presses agronomiques de Gembloux**. 264p.
- Kondra Z. P., Campbell D. C., King J., 1983. Temperature effects on germination of rapeseed (*Brassica napus* L. and *B. campestris* L.). **Canadian Journal of Plant Science** Vol. 63, No. 4, pp. 1063–1065 <https://doi.org/10.4141/cjps83-135>
- Kumar D., Kumar Meena R., Kumar R., Ram H., Kumar R., Kumar Koli G., 2021. Fodder beet: a boon to improve livestock productivity through quality forage production in arid and semiarid regions of India – A review. **Forage Res.** 47 (3) : 257–263.
- Labidi S., Ben Jeddi F., Tisserant B., Yousfi M., Sanaa M., Dalpé Y., Lounès-Hadj Sahraoui A., 2015. Field application of mycorrhizal bio-inoculants affects the mineral uptake of a forage legume (*Hedysarum coronarium* L.) on a highly calcareous soil. **Mycorrhiza** 25(4) : 297–309 [doi:10.1007/s00572-014-0609-0](https://doi.org/10.1007/s00572-014-0609-0)

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Latham L.J., Jones R.A.C., 2001. Alfalfa mosaic and pea seed-borne mosaic viruses in cool season crop, annual pasture, and forage legumes: Susceptibility, sensitivity, and seed transmission. *Australian Journal of Agricultural Research* 52 : 771–790 [doi:10.1071/AR00165](https://doi.org/10.1071/AR00165)
- Lavorel S., Grigulis K., 2012. How fundamental plant functional trait relationships scale-up to trade-offs and synergies in ecosystem services. *Journal of Ecology* 100 : 128–140
- Le Gall M., Montagne L., Jaguelin-Peyraud Y., Pasquier A., Gaudre D., 2011. Prédiction de la teneur en fibres totales et insolubles de matières premières courantes dans l'alimentation du porc à partir de leur composition chimique. 43^{ème} Journées Recherche Porcine, Paris (FR), France : 117–123 <hal-00729392>.
- Lemaire G., Belanger G., 2020. Allometries in Plants as Drivers of Forage Nutritive Value: A Review. *Agriculture*, 10, 5 : 1–17 [doi:10.3390/agriculture10010005](https://doi.org/10.3390/agriculture10010005)
- Letellier M., Fleurent D.-V., 2012. Caractérisation chimique, physique et mécanique de pieux anciens. Projet de fin d'études, Ingénieur 3^{ème} année. Université de Lorraine. 70p.
- Li H., Han S., Nichols P.G.H., Revell C.K., Sivasithamparam K., Barbetti M.J., 2009. Responses of genotypes from species of *Trifolium*, *Ornithopus*, *Biserrula* and *Hedysarum* to a highly virulent race of *Phytophthora clandestina* and new sources of resistance. *Annals of Applied Biology* 155 : 259–265 [doi:10.1111/j.1744-7348.2009.00336.x](https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2009.00336.x)
- Li Y., Johnson D.A., Su Y., Cui J., Zhang T., 2005. Specific leaf area and leaf dry matter content of plants growing in sand dunes. *Bot. Bull. Acad. Sin.* 46 : 127-134.
- Liu P-L., Wen J., Duan L., Arslan E., Ertugrul K., Chang Z-Y., 2017. *Hedysarum* L. (Fabaceae: Hedysareae) Is Not Monophyletic – Evidence from Phylogenetic Analyses Based on Five Nuclear and Five Plastid Sequences. *PLoS ONE* 12 : (1) : 1-19.
- Lombardi P., Argenti G., Sabatini S., Pardini A., 2000. Productive and ecophysiological characteristics of some varieties of sulla (*Hedysarum coronarium* L.) in a Mediterranean area of Tuscany. *CIHEAM; Options Méditerranéennes* 45 : 281-285.
- Mayouf R., 2015. Evaluation pastorale des parcours du Sud de la wilaya de Tébessa: Influence de la saison sur la valeur nutritive. Thèse de Doctorat. Univ. Batna. 113p.
- M'saouar R., Bakkali M., Laglaoui A., Arakrak A., 2019. Evaluation of the mycorrhizal potential of *Hedysarum flexuosum* L. in relation with the soil chemical characteristics in the northwest of Morocco. *Moroccan Journal of Biology* 16: 13-18.
- M'saouar R., Laglaoui A., Bakkali M., Arakrak A., 2017. Mycorrhizal status of *Hedysarum flexuosum* L; in the northwest of Morocco. *Am. J. innov. res. appl. sci.* 5(5): 370-376.
- Mansouri L.M., 2020. Etude des effets des facteurs biotiques et abiotiques sur la nodulation chez le haricot (*Phaseolus vulgaris* L.). Thèse de Doctorat. Université de Batna 2. 207p.
- Manzoor M.N., Sultan J.I., Nisa M.U., Bilal M.Q., 2013. Nutritive evaluation and *In-Situ* digestibility of irrigated grasses. *The Journal of Animal and Plant Sciences*, 23(5): 1223-1227.
- Martinez-Hidalgo P., Hirsch A., 2017. The Nodule Microbiome: N₂-Fixing Rhizobia Do Not Live Alone. *Phytobiomes* Vol. 1, N°2 : 70-82 <https://doi.org/10.1094/PBIOMES-12-16-0019-RVW>
- Mazollier C., 2008. Le spinosad : un nouveau produit insecticide utilisable en AB. *Maraichage bio infos* n° 55 : 1-3.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- McKey D., 1994. Legumes and nitrogen: the evolutionary ecology of a nitrogen-demanding lifestyle. In J. I. Sprent and D. McKey [eds.], *Advances in legume systematics* 5, the nitrogen factor, 211–228. Royal Botanic Gardens, Kew.
- Mckirdy S.J., Jones R.A.C., Latham J., Coutts B.A., 2000. Bean yellow mosaic petro virus infection of alternative annual pasture, forage and cool season: susceptibility and senility seed transmission. *Australian Journal of Agricultural Research* 51 : 325-346 doi.org/10.1071/AR99110
- Medjebeur D., Hannachi L., Ali-Ahmed S., Metna B., Abdelguerfi A., 2018. Effets de la salinité et du stress hydrique sur la germination des graines de *Hedysarum flexuosum* (fabaceae). *Revue d'Ecologie (Terre et Vie)*, Vol. 73 (3) : 318-329.
- Ministre de l'Agriculture et de Développement Rurale (MADR). 2019. statistiques agricoles algériennes, série B.
- Ministre de l'Agriculture et de Développement Rurale (MADR). 2020. statistiques agricoles algériennes, série B.
- Mitchell A., Morag A., 2017. Specificity in Legume-Rhizobia Symbioses. *International journal of molecular sciences* 18 (4): 705 ; <https://doi.org/10.3390/ijms18040705>
- Mnasri B., Mrabet M., Laguerre G., Aouani M.E., Mhamdi R., 2007. Salt-tolerant rhizobia isolated from a Tunisian oasis that are highly effective for symbiotic N₂-fixation with *Phaseolus vulgaris* constitute a novel biovar (bv. mediterranense) of *Sinorhizobium meliloti*. *Arch. Microbiol.* 187 : 79-85.
- Möller J., 2014. Comparaison des méthodes de dosage des fibres sur produits agricoles. Note d'informations. *FOSS. P/N 1026712*, édition 1. 6p.
- Montero-Castaño A., Vilà M., 2017. Influence of the honeybee and trait similarity on the effect of a non-native plant on pollination and network rewiring. *Functional Ecology* 31 : 142-152
- Moore K., Ryley M., Schwinghamer M., Cumming G., Jenkins L., 2011. Chickpea: Phytophthora Root Rot Management. *Northern Pulse Bulletin* 11 : 1-3.
- Moussaouali B., 2014. Contribution à l'étude de l'adaptation du Sulla (*Hedysarum coronarium* L.) en irrigué dans les zones sahariennes (cas de la région de Ghardaïa). Thèse de Magister. Université Chadli Ben Djedid, El-Tarf, Algérie. 111p.
- Moussaouali B., Hamdi-Aïssa B., 2017. Utilisation de traits fonctionnels pour caractériser l'adaptation de *Sulla coronaria* L. aux conditions agroécologiques du Sahara algérien en culture irriguée. *Fourrages* 232 : 341-345.
- Nedjraoui D., 2003. Profil fourrager (Algérie). Ed. FAO. 30p.
- Nevin Dale Young N. D., Mudge J., Ellis T. N., 2003. Legume genomes: more than peas in a pod. *Current Opinion in Plant Biology* 6 : 199-204.
- Noutfia A., 2008. Le Sulla *Hedysarum coronarium* L. Actualité recherche, "Tawasol" Bulletin trimestriel d'information du Centre Régional de la Recherche Agronomique de Tanger (Maroc), Numéro 18. 4p.
- Quiring D.T., Mcneil J.N., 1984. Exploitation and interference intraspecific larval competition in the dipteran leaf miner, *Agromyza frontella* (Rondani). *Can. J. Zool.* 62 : 421-427.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Rabhi M., Farhat N., Krol M., Barhoumi Z., Ivano A.G., McCarthy A., Abdelly C., Hüner N.P.A., Smaoui A., 2017. Effects of Mg deficiency and subsequent recovery on *Sulla carnosa* leaves. **Agrochimica**, Vol. 61 N° 4 : 317-328.
- Rahal S., Chekireb D., 2021. Diversity of rhizobia and non-rhizobia endophytes isolated from root nodules of *Trifolium* sp. growing in lead and zinc mine site Guelma, Algeria. **Archives of Microbiology** 203 : 3839-3849 <https://doi.org/10.1007/s00203-021-02362-y>
- Ranjbar M., 2010. Two New Species of *Hedysarum* (Fabaceae) from Iran. **Journal for Botanical Nomenclature**, 20 (3) : 329-333.
- Ranjbar M., Karamian R. et Johartchi M.R., 2006. Notes on the taxonomy of *Hedysarum* (Fabaceae) in Iran. **Annals of Botanical Fennici** 43: 152–155
- RAP, 2018. Fiche technique : maïs sucré, Pyrale du maïs. Réseau d'avertissements phytosanitaires. Ed. Gouvernement du Québec. 16p.
- Reenu U., Satyawana A., Manisha A., Kavita R., Priyanka D. et Atman P., 2022. Exploiting the heterosis and correlation analysis studies in forage sorghum for quality improvement. **Forage Res.** 48 (1) : 31-36.
- Rekik F., 2015. Contribution à l'évaluation des ressources fourragères des parcours steppiques de l'Est Algérien « Cas de la région de Tébessa ». Thèse de Doctorat Univ. Batna – Algérie. 120p.
- Ricardo M.C., José F.C., 2012. FORRAGENS. Universidade de Évora, Escola de ciências e tecnologia departamento de fitotecnia, 24p.
- Richard D., Chevalet P., Giraud N., Pradere F., Soubaya T., 2008. Sciences de la vie pour les capes et l'agréation. Ed. Dunod, Paris (France).
- Ryley M.J., Lloyd D.L., Johnson B., Teasdale K.C., Mackie J.M., 2004. Rhizoctonia crown and root rot of the pasture legume, sulla (*Hedysarum coronarium*). **Australasian Plant Pathology** 33 : 183–188.
- Rys G. J., Smith N., Slay M.W., 1988. Alternative forage species in Hawke's Bay. **Proceedings of the Agronomy Society of New Zealand** 18 : 75-80.
- Salhi N., 2008. Etude de l'impact de la fertilisation azoté-potassique sur la croissance et le développement de la plante de *Sesbania aculeata* sur sols sableux sous conditions sahariennes dans la région de Ouargla. Thèse de Magister, Université Oum El-Bouaghi , Algérie. 68p.
- Scalbert A, Monties B, Janin G., 1989. Tannins in wood: comparison of different estimation methods. **Journal of Agricultural and Food Chemistry** 37 (5) : 1324-1329. [doi:10.1021/jf00089a026](https://doi.org/10.1021/jf00089a026)
- Schofield P., Mbugua D.M., Pell A.N., 2001. Analysis of condensed tannins: A Review. **Animal Feed Science and Technology** 91(1-2):21–40 [doi:10.1016/s0377-8401\(01\)00228-0](https://doi.org/10.1016/s0377-8401(01)00228-0)
- Selami N., 2015. Etude des Associations Symbiotiques de *Retama monosperma* : Approches Morphologique, Anatomique et Ultrastructurale, Caractérisation Moléculaire des Isolats. Thèse de Doctorat des sciences en Biotechnologie Végétale. Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf – Algérie. 150p.
- Senoussi A., Behir T., 2010. Etude des disponibilités des aliments de bétails dans les régions sahariennes. - Cas de la Région du Souf. **Revue du chercheur** 08.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Shamseldin A., Abdelkhalek A., Sadowsky M. J., 2017. Recent changes to the classification of symbiotic, nitrogen-fixing, legume-associating bacteria: a review. **Symbiosis** 71 : 91-109 <http://doi.org/10.1007/s13199-016-0462-3>
- Slim S., Harbeg L., Hedhly A., Hassan S., Moyo H., Louhaichi M., 2018. Farmers' adoption of Sulla (*Hedysarum coronarium* L.) cultivation as an alternative livestock feed. **Range Management and Agroforestry** 2(39): 274-280.
- Slim S., 2012. Les systèmes fourragers des zones montagneuses: contraintes et intérêts des fabacées dans la fixation des sols et l'accroissement des ressources herbagères des petites exploitations. Thèse de Doctorat, INA Tunisie. 183p.
- Slim S., Ben Jeddi F., 2012. Effets du préfanage et du conditionnement du fourrage de sulla (*Hedysarum coronarium* L.) sur la qualité de son ensilage. **Fourrages** 210 : 159-165.
- Slim S., Ben Jeddi F., Marouani A. et Bouajila K., 2012. Caractéristiques herbagères de la culture du Sulla (*Hedysarum coronarium* L.) en régions montagneuses du Nord de la Tunisie. **Journal of Animal and Plant Sciences**. Vol. 13, Issue 3 : 1831-1847.
- Smart S.M., Glanville H.C., Blanes M.C., Mercado L.M., Emmett B.A., Jones D.L., Cosby B.J., Marrs R.H., Butler A., Marshall M.R., Reinsch S., Herrero-Jauregui C., Hodgson J.G., 2017. Leaf dry matter content is better at predicting above-ground net primary production than specific leaf area. **Funct Ecol** 31: 1336–1344. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12832>
- Sorbier C., 2015. Dosage de la cellulose et des composés phénoliques du bois de robinier. Projet Carbonex. **Projet Carbonex**. 2015, 24 p. hal-01269081.
- Soussou S., 2013. Adaptation de la symbiose Fabacées-rhizobium aux sites miniers : Absorption du zinc par *Anthyllis vulneraria* et analyse de la diversité des bactéries symbiotiques d' *Hedysarum coronarium*. Thèse de Doctorat en Microbiologie, Parasitologie / Agriculture Durable, de Montpellier Supagro / Institut Supérieur Agronomique De Chott-Meriam. 230p.
- Southwell R.I., Crocker G.J., 2005. *Hedysarum* – a new susceptible host for *Phytophthora medicagnis*. **Australasian Plant Pathology** 34 : 265-267 [doi:10.1071/AP05029](https://doi.org/10.1071/AP05029)
- Sprent J. I., Gehlot H. S., 2010. Nodulated legumes in arid and semi-arid environments: are they important? **Plant Ecology and Diversity** Vol. 3, N°. 3 : 211–219.
- Sprent J.I., 1995. Legume trees and shrubs in the tropics: N₂ fixation in perspective. **Soil Biol. Biochem** 27 : 401-407.
- Squartini A., Struffi P., Döring H., Selenska-Pobell S., Tola E., Giacomini A., Vendramin E., Velázquez E., Mateos P.F., Martínez-Molina E., Dazzo F.B., Casella S. et Nuti M.P., 2002. *Rhizobium sullae* sp. nov. (formerly '*Rhizobium hedysari*'), the root-nodule microsymbiont of *Hedysarum coronarium* L. **Int. J. Syst. Evol. Microbiol.** 52 (4): 1267-1276
- SRC, 2004. Dosage de la cellulose brute : Méthode Weende. Ed. INRA – Toulouse, France (sous le code : SRC-ANA-NUT-23). 4p.
- Stacey G., Libault M., Brechenmacher L., Wan J., D May G., 2006. Genetics and functional genomics of legume nodulation. **Current Opinion in Plant Biology** 9 : 110–121 [DOI 10.1016/j.pbi.2006.01.005](https://doi.org/10.1016/j.pbi.2006.01.005)
- Sulas L., Seddaiu G., Muresu R., Roggero P.P., 2009. Fixation de l'azote du sulla en conditions méditerranéennes. **Agronomy Journal** 101: 1470-1478.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Tibaoui G., Guesmi S., Selmi H., Hannach O., 2018. Influence de la salinité sur le comportement agro-physiologique de quelques variétés de Sulla (*Hedysarum coronarium* et *Hedysarum carnosum*). **Journal of new sciences** 52 (5) : 3512-3517.
- Tibaoui G., Zouaghi M., Belhaj S., 2011. Influence du déficit hydrique sur le comportement agro-physiologique de quelques populations tunisiennes du sulla de Sousse (*Hedysarum carnosum* Desf).
- Tibe O., Meagher L-P., Fraser K., Harding D., 2011. Condensed Tannins and Flavonoids from the Forage Legume Sulla (*Hedysarum coronarium*). **Journal of agricultural and food chemistry** 59 : 9402-9409.
- Tlili M.L., Hammoudi R., Dehak K., Hadj-Mahammed M., 2020. Etude de l'activité antioxydante et antimicrobienne des extraits de feuilles de *Pergularia tomentosa* issue d'El oued (Algérie). **Revue des BioRessources** Vol 10, N° 2 : 2-12.
- Trifi-Farah N., Baatout H., Boussaid M., Combes D., Figier J., Hannachi-Salhi A., Marrakchi M., 2002. Evaluation des ressources génétiques des espèces du genre *Hedysarum* dans le bassin méditerranéen. **Bulletin de Ressources Phytogénétiques (Bioversity International)**, No. 130 : 65-72.
- Tuda M., 2007. Applied evolutionary ecology of insects of the subfamily Bruchinae (Coleoptera: Chrysomelidae). **Appl. Entomol. Zool.** 42 (3) : 337-346 [DOI:10.1303/aez.2007.337](https://doi.org/10.1303/aez.2007.337)
- Viçosi, K. A., Peixoto, N., Pelá, A., 2020. Response of snap bean cultivars of determined growing to inoculation with *Rhizobium tropici*. **Agrarian**, 13(49), 352-361.
- Vignau-Loustau L., Huyghe Ch., 2008. Stratégies fourragères. Ed. **France Agricole Editions**. 304p.
- Voisin A.-S., Cellier P., Jeuffoy M.-H., 2015. Fonctionnement de la symbiose fixatrice de N₂ des légumineuses à graines : Impacts Agronomiques et Environnementaux. **Innovations Agronomiques** 43: 139-160.
- White J.A., Ryley M.J., George D.L., Kong G.A., 2014. Optimal environmental conditions for infection and development of *Puccinia purpurea* on sorghum. **Australasian Plant Pathol.** 43 : 447–457 [DOI10.1007/s13313-014-0292-9](https://doi.org/10.1007/s13313-014-0292-9)
- Wojciechowski M.F., Lavin M., Sanderson M.J., 2004. A phylogeny of legumes (Leguminosae) based on analysis of the plastid matK gene resolves many well-supported subclades within the family. **American Journal of Botany** 91 (11) : 1846-1862.
- Xiaochen L., Ming L., Xin L., Sha L., Chao Y., Chunmei M., Zhenping G., 2020. Assessing the Systematic Effects of the Concentration of Nitrogen Supplied to Dual-Root Systems of Soybean Plants on Nodulation and Nitrogen Fixation. **Agronomy** 10, 763 : 2-16 [doi:10.3390/agronomy10060763](https://doi.org/10.3390/agronomy10060763)
- You M. P., Barbetti M. J., 2019. Manipulating the ecosystem enables management of soilborne pathogen complexes in annual legume forage systems. **Plant pathology** 68, Issue3, 454-469. <https://doi.org/10.1111/ppa.12963>
- Yurkevich O.Y., Samatadze T.E., Selyutina I.Y., Romashkina S.I., Zoshchuk S.A., Amosova A.V., Muravenko O.V., 2021. Molecular Cytogenetics of Eurasian Species of the Genus *Hedysarum* L. (Fabaceae). **Plants** 10, 89: 2-15. <https://doi.org/10.3390/plants10010089>

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Zirmi-Zembri N., Kadi S. A., 2016. Valeur nutritive des principales ressources fourragères utilisées en Algérie (1- Les fourrages naturels herbacés). *Livestock Research for Rural Development* 28 (8) : 16p.
- Zirmi-Zembri N., Kadi S.A., 2020. Morphological Diversity Assessment of Five Populations of Sulla (*Hedysarum flexuosum* L.) Harvested at Five Phenological Stages in Kabylie region (Algeria). *Journal of Rangeland Science*, Vol. 10, No. 3 : 341– 356.
- Zirmi-Zembri N., Kadi S.A., 2021. Use of *Sulla flexuosa* (*Hedysarum flexuosum*) by breeders in Kabylia (Algeria). *Options Méditerranéennes*, A, n°. 125 : 605–609.
- Ziyuan Z., Minghan Y., Guodong D., Guanglei G., Yingying H., Genzhu W., 2020. Effects of *Hedysarum* leguminous plants on soil bacterial communities in the Mu Us Desert, northwest China. *Ecol Evol.* 10(20): 11423–11439. [doi: 10.1002/ece3.6779](https://doi.org/10.1002/ece3.6779)