



FACULTEIT BIO-INGENIEURSWETENSCHAPPEN
Academiejaar 2004-2005



***HEDYSARUM CORONARIUM L.: VARIATION GENETIQUE,
CREATION VARIETALE ET UTILISATION DANS DES
ROTATIONS TUNISIENNES***

***HEDYSARUM CORONARIUM L.: GENETISCHE VARIATIE,
ONTWIKKELING VAN NIEUWE RASSEN EN GEBRUIK IN
TUNESISCHE GEWASROTATIES***

par/door
Ma. ir. F. BEN JEDDI

Thèse présentée pour l'obtention du grade de Docteur (Ph.D.) en Sciences
Biologiques Appliquées

Proefschrift voorgedragen tot het bekomen van de graad van Doctor in de
Toegepaste Biologische Wetenschappen

Op gezag van
Rector: **Prof. dr. apr. A. De LEENHEER**

Decaan:
Prof. dr. ir. H. VAN LANGENHOVE

Promotor:
Prof. dr. ir. D. REHEUL

ISBN: 90-5989-065-5

DECLARATION-STATEMENT

L'auteur et le promoteur autorisent la consultation de ce travail uniquement pour l'usage personnel. Toute autre utilisation est interdite par la loi d'impression. La reproduction d'une partie de ce travail doit se faire avec l'accord au préalable de l'auteur.

De auteur en de promotor geven de toelating dit proefschrift voor consultatie ter beschikbaar te stellen en delen ervan te kopiëren voor persoonlijk gebruik. Elk ander gebruik valt onder de beperking van het auteursrecht, in het bijzonder met betrekking tot de verplichting uitdrukkelijk de bron te vermelden bij het aanhalen van resultaten uit dit proefschrift.

The author and promoter give the authorisation to consult and copy parts of this work for personal use only. Any other use is limited by laws of copyright. Permission to reproduce any material in this work should be obtained from the author.

Gent, 13 juin 2005

Auteur:

Ma. ir. Fayçal BEN JEDDI

Promotor:

Pr. dr. ir. Dirk. REHEUL

Remerciements

Avant tout, j'adresse ma gratitude au Président de l'IRESA (Institution de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur Agronomiques de Tunisie) Pr. A. Mougou qui ne cesse de m'encourager et de me conseiller afin que je termine ma thèse dans les meilleurs délais. Ma considération et respect sont adressés au Directeur général de l'INAT (Institut National Agronomique de Tunisie) Pr. F. Lebdi qui a tout fait pour que je puisse finir ma thèse et me consacrer aux travaux d'enseignement et de recherche. Qu'ils trouvent dans ces quelques mots mes remerciements les plus sincères.

Je remercie sincèrement Professeur D. Reheul, pour tout ce qu'il a fait afin que je puisse défendre cette présente thèse. Qu'il trouve ici l'expression de ma sincère gratitude et respect. Pr. T. Behaeghe à qui j'adresse mes remerciements les plus profonds.

J'adresse particulièrement mes remerciements aux membres du Jury Pr. G. Hofman, Pr. R. Bulcke, Pr. P. Van Damme, Pr. P. Goetghebeur, et Pr. G. Haesaert qui m'avaient très gentiment accueilli dans leurs laboratoires. Je profite de l'occasion pour leur adresser mes sincères respects. Leurs remarques et suggestions ont été très utiles et fructueuses pour la finalisation de cette thèse.

Un devoir pour moi de remercier Pr. M. Zouaghi qui s'est intéressé spécialement à cette recherche après la mise au point en 1998 d'une nouvelle variété de *Hedysarum coronarium* L. Bikra 21.

Mes remerciements vont aussi au personnel de l'AGCD (Agence Générale de la Coopération au Développement) à Bruxelles (Belgique); de l'IRESA à Tunis (Tunisie); et de l'INAT à Tunis (Tunisie) qui m'ont permis d'effectuer une série de stages à la Faculté des Sciences en Bio-ingénierie de Gent en Belgique afin de finaliser mes travaux de recherche en thèse.

Ma gratitude concerne Pr. C. kayouli qui m'a bien permis de réaliser certaines analyses dans son Laboratoire. Pour son aide et ses conseils qu'il ne cesse de me les présenter à tout moment. Ses collaborateurs Pr. N. Moujahed et C. Damergi que je ne n'oublie pas ici pour les remercier.

Je me fais un immense plaisir de remercier notre actuel Directeur de Département Pr. Y. Harbaoui pour ses conseils et son encouragement quotidien. De même, je profite de l'occasion pour adresser mes sincères remerciements à Monsieur le Directeur Général de l'Institut des Régions Arides de Tunisie Pr. H. Khatteli pour tout ce qu'il a présenté comme aide et conseil.

Je n'oublie jamais mon collègue et frère Dr. A Sahli à qui j'adresse mon plus haut respect et ma sincère gratitude qu'il trouve dans ces quelques mots l'expression de mon profond remerciement. Je n'oublie jamais son soutien aux moments les plus difficiles de l'élaboration de cette thèse !

Je me fais un plaisir de remercier Pr. S. Rezgui pour son aide et ses remarques utiles lors des nombreux traitements statistiques de toutes les données expérimentales.

Par la même occasion, je ne peux me retenir pour remercier M. M. Pr. M. E. Hamza, M. Sanaa, B. Haddad, M. Ben M'rad, A. Boubakker, T. Najjar pour leurs conseils et aides durant toute la période de préparation de ma thèse. J'espère qu'ils trouvent ici l'expression de ma sincère gratitude.

Je ne peux me retenir pour présenter mes respect et remerciement à tous les enseignants et cadres des Laboratoires de notre INAT. Je cite en particulier Pr. A. Daaloul, Pr. F. Slama, Pr. S. Ben El Hadj, Pr. A. Dahmane, Dr. H. Bel hadj Salah, Dr. M. Ben Mimoun, Dr. S. Bornaz-sahli, Pr. R. Hallali, Pr. A. M'hiri, Dr. A. Jemmali, Pr. H. H'baieb, Dr. K. Zayani, Dr. M. Masmoudi, Pr. H. Daghari, Dr. F. Sfar, Pr. N. Nabli, Pr. A. Alouini, Dr. S. Chennoufi, Dr. R. Laajimi, Dr. S. Triki, Dr. Med. Chérif, Pr. M. Harrabi, Dr. H. Amara-Slim, Pr. T. Tissaoui, Dr. T. Bettaeib, Dr. N. Tarchoun et d'autres que je n'ai peut être pas cité.

Il est temps d'adresser ma gratitude à M.M. Pr. M. Ben Hammouda et Pr. B. Nasraoui qui m'ont permis et aider à installer mes essais multilocaux à Mateur et EL Kef. .

Je n'oublie pas de remercier profondément le personnel du service de la Production végétale de la DGPA en particulier Monsieur le Directeur Général notre Professeur A. Daaloul pour ses conseils remarquables. M. O. Khriji à qui j'adresse mes remerciements les plus sincères. Par la même occasion je ne peux passer sans adresser mes remerciements à la CCSPS en particulier M^{me} I. Amri-Ben Jemiaa et M^{elle} S. Dhane ingénieurs spécialisés dans la production de semences fourragères. Qu'elles trouvent ici l'expression de ma sincère gratitude pour leurs aide et encouragement. Je n'oublie jamais le geste de M^{elle} S. Dhane qu'elle avait pu faire pour moi afin que je puisse finaliser ma thèse dans de bonnes conditions.

M. A. Mouelhi, ce grand homme à qui je ne peux passer sans le remercier et lui adresser mes sincères respects. Mes étudiants et amis, Khaddouja à qui je souhaite le bonheur du monde, B. Mouelhi, S. Slim, S. Labidi, H. Sbei qui ont été très serviables et gentils, je leurs souhaite un avenir plein de succès.

A tous les Commissariats Régionaux de Développement Agricole en particulier de Bizerte, Bêjâ, Ben Arous, Ariana, Mannouba, Jendouba, Siliana, Zaghuan, Nabeul, Sousse et Kairouan pour leurs aides lors des travaux de prospection et collecte des semences. De même, je salue tous les postes de la Garde Nationale en particulier frontaliers, pour leur bravoure et aide. Je n'aurais jamais pu réaliser mes collectes comme prévu sans leurs interventions. Qu'ils trouvent ici l'expression de mon sincère remerciement.

Je me souviens toujours avec gratitude des aides de tout le personnel de notre chère Laboratoire de Productions Fourragère et Pastorale de l'INAT en particulier K. Laroussi, A. Kloula, Am Fehri, A. Jehha, M. Chaibi, M. Jébali, A. Chérif, H. F'taimi Ayari, Jabrane et Salah qu'ils trouvent tous l'expression de ma respectueuse considération.

Je dis encore une fois Merci à tous ceux que j'ai oublié .

Je dédie cette recherche à tous les chercheurs qui bataillent pour sauvegarder les ressources phylogénétiques.

Fayçal Ben Jeddi
Gent, 13 juin 2005

SOMMAIRE

SAMENVATTING	v
RESUME	ix
LISTE DES ABREVIATIONS	xiii
LISTE DES TABLEAUX	xv
LISTE DES FIGURES	xix
INTRODUCTION GENERALE	1
PARTIE 1	
ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE	5
1. PRESENTATION DE <i>Hedysarum coronarium</i> L.	5
1. 1. Répartition géographique de l'espèce	5
1. 2. Description botanique du sulla du nord	5
1. 3. Eco-systèmes à sulla du nord	7
2. EXIGENCES NATURELLES ET POTENTIEL FOURRAGER DE <i>Hedysarum coronarium</i> L.	11
2. 1. Aperçu historique	11
2. 2. Préférences édaphiques du sulla du nord	11
2. 3. Mode de reproduction et pollinisation chez le sulla du nord	12
2. 4. Potentiel fourrager du sulla du nord	14
2. 5. Valeur fourragère du sulla du nord	16
3. VULNERABILITE DE LA DIVERSITE BIOLOGIQUE DE <i>Hedysarum coronarium</i> L. ET MENACES	17
3. 1. Définitions de la diversité biologique	17
3. 2. Contraintes liées à la diversité biologique	18
4. COLLECTE ET PRESERVATION DU GERMOPLASME FOURRAGER	20
4. 1. Techniques de collecte du germoplasme	20
4. 2. Qualité et conservation de semences fourragères	21
5. SELECTION ET CRITERE DE SELECTION DES ESPECES FOURRAGERES	25
6. EVALUATION DU GERMOPLASME FOURRAGER	28
6. 1. Evaluation du matériel séminal	29
6. 2. Evaluation de l'interaction génotypes-environnements	31

7. PARTICULARITES ET CONDUITE DES CULTURES FOURRAGERES SEMENCIERES	32
7. 1. Généralités	32
7. 2. Cas des fabacées fourragères	33
7. 3. Exemple du sulla du nord	34
8. LES SYSTEMES DE PRODUCTION AGRICOLE ET DURABILITE	34
8. 1. Définitions	35
8. 2. Durabilité des systèmes de culture	36
9. IMPACT DES ROTATIONS SUR LES SYSTEMES DE CULTURE	39
9. 1. le milieu édaphique	39
9. 2. Le système céréalier	43
9. 3. Effet phytosanitaire des rotations	46
10. APERÇU SUR LES ESPECES UTILISEES DANS LES ROTATIONS AVEC <i>Hedysarum coronarium</i> L.	47
10.1. Cas du blé dur (<i>Triticum durum</i> Desf.)	47
10.2. Cas de la féverole (<i>Vicia faba</i> L. var. <i>minuta</i> (Hort. ex Alef.) Mansf.)	47
10.3. Cas du colza (<i>Brassica napus</i> L.)	48
PARTIE 2	
MATERIELS ET METHODES	49
1. PRESERVATION DU GERMOPLASME AUTOCHTONE DE <i>Hedysarum coronarium</i> L.	49
1. 1. Constitution d'une collection	49
1. 2. Etude de la variabilité germinative des sullas collectés	53
1. 3. Mise au point des techniques de conservation des semences du sulla du nord	53
2. CARACTERISATION DES SITES DES ESSAIS EXPERIMENTAUX	55
2. 1. Site de Tunis-INAT	55
2. 2. Sites de l'essai interaction sulla du nord avec l'environnement	59
3. SELECTION DE <i>Hedysarum coronarium</i> L. SPONTANEE	61
3. 1. Programme de la sélection	61
3. 2. Installation des essais	65
3. 3. Evaluation de la diversité génotypique des populations spontanées du sulla du nord	66
3. 4. Evaluation de la génération F4 de sélection	69
4. REPOSE DES GENOTYPES SELECTIONNES DE <i>Hedysarum coronarium</i> L. AUX VARIATIONS DU MILIEU	72
4. 1. Effets des stress salin et hydrique sur le pouvoir germinatif des sullas sélectionnés	72
4. 2. Effet d'une variation de milieu sur le potentiel agro-fourragère des sulla sélectionnés	74

5. ETUDE DES ARRIERES-EFFETS DE <i>Hedysarum coronarium</i> L. DANS LES SYSTEMES DE ROTATION	78
5. 1. Caractéristiques agronomiques du matériel biologique utilisé	78
5. 2. Présentation générale du dispositif expérimental de l'essai	79
5. 3. Installation des systèmes de rotation	80
5. 4. Paramètres mesurés durant l'essai	83
6. ANALYSES STATISTIQUES DES DONNEES	91
6. 1. essais sur la diversité biologique des populations spontanées du sulla du nord local et son amélioration	91
6. 2. essais d'évaluation des génotypes sélectionnés du sulla du nord et des systèmes de rotation	91
PARTIE 3	
RESULTATS ET DISCUSSIONS	93
1. ETUDE DE LA DIVERSITE GENOTYPIQUE DE <i>Hedysarum coronarium</i> L.	93
1. 1. Présentation des populations de <i>Hedysarum coronarium</i> L.	93
1. 2. Evaluation du matériel séminal des populations sauvages de <i>Hedysarum coronarium</i> L.	96
1. 2. 1. Variation du poids de mille graines	96
1. 2. 2. Comportement germinatif suite à une variation thermique	98
1. 2. 3. Estimation des graines dures	103
1. 3. Effet du degré d'humidité des semences de <i>Hedysarum coronarium</i> L. sur leur germination après conservation à différentes températures	104
1. 4. Analyse de la diversité génotypique des populations sauvages de <i>Hedysarum coronarium</i> L.	106
2. CREATION VARIETALE ET EVALUATION FOURRAGERE DES GENOTYPES SELECTIONNES DE <i>Hedysarum coronarium</i> L.	114
2. 1. Evaluation de la sélection de <i>Hedysarum coronarium</i> L.	114
2. 1. 1. Prévision de la réponse à la sélection	114
2. 1. 2. Etude du potentiel de production fourragère des génotypes sélectionnés	116
2. 1. 3. Etude de la surface foliaire des génotypes sélectionnés	117
2. 1. 4. L'architecture des plantes	119
2. 1. 5. La valeur nutritive des génotypes sélectionnés	120
2. 1. 6. Conclusion	122
2. 2. Effet de la salinité et de la sécheresse simulée sur la germination des génotypes sélectionnés de <i>Hedysarum coronarium</i> L.	123
2. 2. 1. Etude de la germination en milieux de stress salin	123
2. 2. 2. Etude de la germination en milieux de stress hydrique	126
2. 3. Comportement fourrager de quelques génotypes sélectionnés de <i>Hedysarum coronarium</i> L. dans deux bioclimats différents	129
2. 3. 1. Evaluation du potentiel productif	129
2. 3. 2. Stabilité de la production fourragère	134
2. 3. 3. Rendements énergétique et protéique des sallas	135
2. 4. Conclusion	138

3. PLACE DE <i>Hedysarum coronarium</i> L. DANS LES SYSTEMES DE ROTATION	138
3. 1. amélioration des systèmes de rotation par le sulla	138
3. 1. 1. Effet des rotations sur la fertilité organique du sol	138
3. 1. 2. Productivité des systèmes de rotation	144
3. 1. 3. Estimation des productions énergétiques par cycle de rotation quadriennal	146
3. 1. 4. Importance des productions protéiques	148
3. 2. arrière-effet de <i>Hedysarum coronarium</i> L. sur la production du blé dur	149
3. 2. 1. Relation entre reliquat azoté dans le sol et exportation par le blé	149
3. 2. 2. Dynamique de la surface foliaire du blé dans les systèmes de rotation	150
3. 2. 3. Estimation du gain en grains par le blé	152
3. 3. Conclusion	153
 <i>PARTIE 4</i>	
CONCLUSIONS, DISCUSSIONS ET PERSPECTIVES	155
 <i>BIBLIOGRAPHIE</i>	161
 <i>ANNEXES</i>	185
 <i>CURRICULUM VITAE</i>	199

SAMENVATTING

Het proefschrift bevat een uitgebreide literatuurstudie over de *Hedysarum coronarium* L., een vlinderbloemige plant met goede groenvoedereigenschappen. In een tweede deel beschrijft de auteur zijn prospectiewerk om een grote reeks verschillende populaties en ecotypes van *Hedysarum coronarium* L. te verzamelen en te karakteriseren. Met de beloftevolste ecotypen vat hij in een derde deel een selectieprogramma aan om landbouwkundig aantrekkelijke rassen te maken. Tenslotte onderzoekt hij hoe de teelt van het voedergewas het best past in een vruchtwisselingsschema.

In Tunesië is de landbouw de jongste jaren ingrijpend veranderd: het areaal weidegebieden en steppen, die decennia lang begraasd werden door rondtrekkende kudden, is fel gekrompen omdat het voor een deel is omgezet in akkerland waar boeren nu o.a. graangewassen verbouwen zoals harde tarwe (*Triticum durum* Desf.). Op deze akkers ontstaat veel erosie, vooral op de kwetsbare mergelhoudende gronden, waar *Hedysarum coronarium* L. bij voorkeur groeit. De overblijvende weidegebieden worden bovendien sterk overbegraasd, vooral tijdens droge jaren, zoals ze voorkwamen aan het begin van de 21^{ste} eeuw. De herders komen er in zulke jaren veel te vaak terug met hun kudden, smakelijke voederplanten worden continu afgegraasd en krijgen de kans niet om zaden te vormen. Waardevolle voederplanten, zoals *Hedysarum coronarium* gaan daardoor sterk achteruit en planten die niet worden gelust door het rondtrekkend vee nemen uitbreiding: dit is o.a. het geval voor *Asphodelus microcarpus* Salm. et Viv. Herders verhuizen dan naar gronden waar wel nog smakelijke planten groeien en waar de degeneratie zich versterkt herhaalt. *Hedysarum coronarium*, is één van de voornaamste slachtoffers van dit proces wat tijdens een prospectie doorheen het land heel erg naar voren kwam. Populaties, zoals populatie S1 uit Sidi Médien, die tijdens de periode 1989-1991 nog uitvoerig geïnventariseerd werden, waren tijdens prospecties in 2002-2003 volledig verdwenen en dit duidelijk als gevolg van de overbegrazing tijdens de droge jaren 2000-2002. Gelukkig zorgt een reserve in de zaadbank voor een potentieel heropleven, zoals dit werkelijk vastgesteld is voor populatie S1: na hevige voorjaarsregens, waren er in april 2004 weer enkele planten aanwezig. Een deel van de zaden van *Hedysarum coronarium* blijft als harde zaden vrij lang levenskrachtig in de bodem en van zodra de omstandigheden gunstig zijn, kiemen ze. Nu is het percentage harde zaden erg verschillend van populatie tot populatie: in populatie S1 bedraagt het niet meer dan 4%, terwijl het in andere spontane populaties, zoals S25, kan oplopen tot 85%. Hoe groter het percentage harde zaden, hoe groter de overlevingskans.

Om de genetische diversiteit binnen soorten zoals *Hedysarum coronarium* te redden is het bewaren van een zaadvoorraad in een zaadbank een goede optie. Uit dit onderzoek is gebleken dat de zaden, bewaard bij -18°C , na 5 jaar nog steeds een kiemkracht hadden van minstens 80%, op voorwaarde dat ze teruggedroogd werden tot een vochtgehalte van 4%. Het vochtgehalte van de zaden is erg bepalend voor hun langleeftbaarheid en dit is zeker het geval als ze bewaard worden bij omgevingstemperatuur.

Tijdens het onderzoek, zijn 27 spontane populaties van *Hedysarum coronarium* verzameld in gebieden met een uiteenlopende klimaats- en bodemomstandigheden. Zo is een grote genetische diversiteit in de collectie verzekerd. De groeihabitus varieerde van erg plat tot opgericht met alle tussenvormen. De meeste planten hebben vormen echter zowel platgroeïende als opgericht groeiende stengels.

De populaties werden tijdens het onderzoek in Tunis uitvoerig bestudeerd en een hele reeks parameters werden opgemeten: vorm en afmetingen van zaden, cotyledonen, jonge en volwassen bladeren, stengels, bloemen, en een reeks parameters die de biomassavorming beïnvloeden. Tussen populaties zijn duidelijk significante verschillen aangetoond. Bovendien is het op basis van een discriminant analyse mogelijk gebleken de verzamelde populaties in verschillende groepen te verdelen. Zo groeien de populaties die tot groep A behoren tot 43% sneller dan de andere populaties. De populaties in groep B2 zijn op het moment van de bloei meer dan een meter lang en wat veel belangrijker is: ze hebben dan een droge stof (DS) gehalte van meer dan 20%, wat erg belangrijk is bij het winnen van voerdroogkuilvoeder. De populaties uit groep D3 hebben de hoogste blad/stengelverhouding, nl. 0,9: hoe hoger deze verhouding, hoe beter de voederwaarde, want de bladeren zijn de voedzaamste delen.

De populaties verschilden significant voor wat betreft de optimale kiemtemperatuur, met uiterste waarden van 7,5°C voor groep A2 en 18,3°C voor groep D3.

Op basis van deze gegevens zijn een reeks populaties geïdentificeerd met waardevolle veredelingspotentie, nl. S1, S4, S7, S9, S10 en S14.

Te Tunis is binnen de 27 populaties een programma van fenotypische recurrente familiesselectie uitgevoerd met als doel een beter ras te maken dan het ras dat boeren nu verbouwen, nl. 'Sgaravatti', een ras van Italiaanse origine. Selectiecriteria waren o.a.: snelle aanvangsgroei, een goede groei tijdens de winter en tijdens het vroege voorjaar (wanneer de nood aan voeder het grootst is), dikke sterk vertakte stengels (productiviteit), hoog DS gehalte, hoog eiwitgehalte en een grote blad/stengel verhouding rond de bloei (het stadium waarin wordt geoogst).

Na 4 selectiecycli bleven 17 genotypen uit 11 van de 27 oorspronkelijke populaties over. De selectievooruitgang was ronduit spectaculair: de gemiddelde winterproductie van deze 17 genotypen lag 4,3 ton/ha DS hoger dan het gemiddelde van de 27 startpopulaties; analoog voor het eiwitgehalte dat met 3,9%-eenheden verbeterd was en voor de bladoppervlakte die met 322 cm² per plant was toegenomen. Na vergelijking met het referentieras 'Sgaravatti', bleven 6 extra waardevolle genotypen over; hieronder bevond zich S1L10, gekenmerkt door een hoog DS gehalte bij de bloei, nl. 25% versus 14,6% voor 'Sgaravatti'. S1L10 had bovendien een ruw eiwitgehalte van 19% en een *in sacco* verteerbaarheid van 82,4% waardoor dit genotype een uitstekend voedertype is..

De 6 beste genotypen (S1L10, S4L4, S7L7, S9L1, S10L4 en S14L6) zijn verder uitvoerig getest tijdens de periode 1996-1988 op twee plaatsen: onder semi-aride omstandigheden (jaarlijkse neerslag 350-450 mm) aan het INAT te Tunis en onder subhumide omstandigheden (jaarlijkse neerslag 500-600 mm) te Mateur. In het laboratorium is aanvullend de kiemkracht bestudeerd onder omstandigheden van water- en zoutstress om na te gaan welke van de selecties het geschiktst zijn om te telen in marginale gebieden.

Onder semi-aride omstandigheden met zijn onregelmatige neerslag presteerde 'Sgaravatti' slecht: gedurende het eerste jaar produceerde dit referentieras 1,1 ton DS/ha tegen 9,2 ton voor S7L7. Gemiddeld over de twee productie jaren bedroeg de energie- respectievelijk ruw eiwitopbrengst van 'Sgaravatti' 1819 UFL/jaar/ha en 0,4 ton/jaar/ha versus 6858 UFL/jaar/ha en 1,3 ton/jaar/ha voor S7L7. (UFL: unité fourragère laitière, netto energie voor lactatie).

Gemiddeld over de twee productie jaren en over de twee locaties bracht 'Sgaravatti' 13,2 ton DS/ha op; S7L7 daarentegen 21,4 ton.

Bij 'Sgaravatti' daalt de *in sacco* verteerbaarheid sterk tussen de eerste en de laatste snede. Bij de 6 geteste genotypen is dit verval kleiner. Het beste genotype was hier S1L10 met een verschil van 7,9 en 10,1 %-eenheden respectievelijk onder semi-aride en subhumide omstandigheden.

'Sgavaratti' kiemt niet goed in droge omstandigheden. Tijdens het onderzoek werden droge omstandigheden gesimuleerd door het toevoegen van PEG (polyethyleenglycol) aan de kiemoplossing. Een hoeveelheid PEG die de waterpotentiaal doet dalen tot -0,8 bar, was lethaal voor de helft van de zaden: LD₅₀ = -0,8 bar. Bij S7L7 was dit -3,5 bar en bij S14L6 was dit zelfs -4,4 bar. S7L7 was ook superieur bij het kiemen in zoute omstandigheden met een LD₅₀ bij 7,5 g NaCl/liter, tegen 6,1 g NaCl/l voor S1L10 en 4,2 g/l voor 'Sgavaratti'.

Gedurende een periode van tien jaar (1990-1999) is onderzoek verricht naar de waarde van *Hedysarum coronarium* in akkerbouwrotaties. Volgende vruchtwisselingen met vierjarige cycli werden vergeleken 1) BBBB: monocultuur van harde tarwe, 2) JBBB: harde tarwe na braak, 3) SSBB: twee jaar *Hedysarum coronarium* gevolgd door 2 jaar harde tarwe 4) SSBF: twee jaar S gevolgd door B en door veldboon, *Vicia faba* L. var. *minuta* (Hort. ex Alef.) Mansf.(F) en 5) SSBC: twee jaar S gevolgd door B en door koolzaad, *Brassica napus* L.

Volgende hoeveelheden stikstof (kg/ha/jaar) werden toegediend in deze vierjarige cycli. BBBB: 120-120-120-120; JBBB: 0-120-0-120; SSBB: 0-0-0-53; SSBF: geen; SSBC: 0-0-0-93.

Na BBBB was het gehalte aan organisch materiaal in de bodem met 0,14%-eenheden gedaald; dit stemt overeen met een verlies van 9,7 ton organisch materiaal in een bodemprofiel van 60 cm diep. Met S in de vruchtwisseling ging het gehalte aan organisch materiaal vooruit: een winst van 0,76%-eenheden onder SSBB en een winst van 0,80%-eenheden onder SSBF. De oogstresten na een tweejarige teelt van S brachten 9,2 ton extra organisch materiaal in de bodem; na twee jaar B was dit 3,4 ton/ha.

Samenvatting

Over een periode van tien jaar schommelde de jaarlijkse stikstofbehoefte van harde tarwe in monocultuur tussen 100 en 120 kg N/ha. Deze hoeveelheden konden quasi volledig worden gedekt via de nalevering door *Hedysarum coronarium* die in de rotatie SSBB 227 kg N/ha naleverde.

In vergelijking met BBBB was de bladoppervlakte van harde tarwe (stadium aarschuiven) in alle rotaties waar ze na *Hedysarum coronarium* L. kwam, substantieel hoger: 550 cm²/plant versus 250 cm²/plant. De opbrengst was duidelijk hoger, nl. 5,7 ton/ha versus 4,1 ton/ha.

Het eiwitgehalte van de harde tarwe was in alle rotaties hoger dan in monocultuur, variërend van 11,8 %(BBBB) tot 14,2 %(SSBC).

Rotatie SSBC leverde per ha over de hele vierjarige cyclus 18000 UFL en 3600 kg ruw eiwit.

Met deze studie is aangetoond dat het de moeite loont om spontane populaties van *Hedysarum coronarium* in stand te houden. Ze bleken een erg waardevolle genenpool bij de veredeling van de soort voor lokale omstandigheden: de resultaten van enkele cycli recurrenente fenotypische familieselectie waren spectaculair. Het inschakelen van dit gewas om monoculturen van harde tarwe te doorbreken biedt meerdere voordelen: *Hedysarum coronarium* zorgt ervoor dat het gehalte aan organisch materiaal in de bodem toeneemt in plaats van af te nemen onder een systeem van monocultuur. Bovendien zorgt het gewas door stikstoffixatie en stikstofnalevering aan de volggewassen voor hoge opbrengsten bij een zeer bescheiden gebruik van minerale stikstof.

RESUME

Actuellement, la diversité biologique fourragère et pastorale se trouve sous la menace de plusieurs facteurs biotiques et abiotiques. L'effet de ces facteurs s'est accentué là où l'agriculture a déformé le paysage par conversion de la végétation naturelle des prairies et parcours en cultures stratégiques comme le blé dur (*Triticum durum* Desf.). En conséquence, une érosion intense s'est installée principalement sur les terres fragiles de nature marneuse représentant le substrat préférentiel de l'espèce *Hedysarum coronarium* L.. Cette situation s'est aggravée en années de sécheresse qui ont rompu brutalement le cycle de reproduction des plantes en poussant le cheptel en manque de besoin à s'abattre sur la végétation naturelle depuis sa levée. Sur ces terres à sulla, seules les plantes indésirables comme les asphodèles (*Asphodelus microcarpus* Salzm. et Viv.) ont échappé à la dent de l'animal. Alors, le phénomène de surpâturage ne peut que se confirmer. Dans cette situation, le sulla du nord est devenu l'une des principales espèces fourragères les plus touchées. Les observations qui ont été faites lors des opérations de prospection et collecte du germoplasme ont bien confirmé l'effet des actions précitées sur le sulla spontané.

Certaines populations recensées entre 1989 et 1991, ont presque disparu de leur habitat naturel. La population S1 de Sidi Médien a fait preuve. Ce sulla a été tellement touché par le surpâturage et les sécheresses exceptionnelles des années 2000-2002, qu'il n'a pas été trouvé lors des prospections de 2002 et 2003. Cependant, la nature peut cacher des secrets qui ne peuvent être démasqués qu'en situation particulière. En avril 2004, une nouvelle prospection dans le site du sulla S1 a montré cette fois-ci que ce sulla n'a pas vraiment disparu de son habitat naturel, vu la renaissance de deux plantes très probablement à partir de vieilles graines dures conservées dans le sol. En effet, les grandes pluies tombées au cours de cette année ont joué un rôle déterminant dans la levée de la dormance tégumentaire de ces semences. Le taux de graines dures très diversifié dans les populations spontanées a pu atteindre 85 % comme dans S25, n'est pas un acquis du hasard mais il représente une forme d'adaptation aux conditions climatiques très aléatoires. Ainsi, les populations sauvages à plus faible taux de graines dures seraient les plus menacées par la disparition. Le sulla S1 est un exemple concret vu son plus faible taux de graines dures de 4 %.

Afin d'éviter l'action néfaste de ces événements, seule la conservation peut sauvegarder et préserver le germoplasme fragile et vulnérable du sulla du nord. La déshydratation des semences de sulla jusqu'à 4 % d'humidité suivie d'une conservation à -18°C a maintenu leur germination à un niveau au moins égale à 80 % pendant plus de cinq années. Dans ce cas, l'humidité relative des semences lors de la récolte représente un facteur primordial pour leur longévité. Ce facteur est d'autant plus important que le mode de conservation devienne classique à température ambiante.

Le germoplasme collecté de *Hedysarum coronarium* L. a rassemblé 27 populations spontanées de diverses origines pédoclimatiques. Une diversité biologique très large a été ainsi trouvée. L'architecture des plantes allant de l'orthotropie à la plagiotropie avec toutes ses variantes a été déterminée. Cependant, la mixture des tiges constatée sur une même plante s'est trouvée prédominante et a touché 56 % des populations.

La caractérisation de ce germoplasme sauvage dans le site de Tunis a révélé des groupes génotypiques très distincts selon les variables mesurées. Ces variables ont touché presque toutes les composantes de la plante comme la semence, les cotylédons, les jeunes et les feuilles adultes, les tiges, la fleur, plus les paramètres liés à la croissance et à la production de la plante. Il a été trouvé une différence inter-génotypique significative à l'échelle de tous les paramètres. L'analyse factorielle par correspondance et la mise au point d'un dendrogramme de classification des sillas a mis en évidence des groupes différents selon leurs spécificités. Ainsi, les génotypes appartenant au groupe dit A, se sont différenciés par une installation suivie d'une croissance plus élevée de 43 % par rapport au reste. Néanmoins, d'autres groupes ont été aussi importants, comme B2 qui a englobé les sillas de haute taille dépassant 100 cm au stade floral avec des taux de matière sèche supérieurs à 20 %. Le rapport feuilles sur tiges est un indice de qualité pour le fourrage. Ce rapport a atteint 0,9 dans le groupe D3. Une différence hautement significative a été toute fois trouvée au niveau de la germination des graines de sillas. La température qui avait entraînée le maximum de germination a varié de 7,5 à 18,3°C respectivement pour les groupes A2 et D3. Toute fois, les basses températures comme 5°C ont affecté positivement la germination de 48 % des populations des sillas étudiées. Ces groupes de classification ont englobé une source de génotypes très utiles pour le programme de sélection comme S1, S2, S4, S6, S7, S9, S10, S13 et S14.

La sélection récurrente phénotypique et demi-frères pratiquée sur le sulla sauvage a été faite dans le même site que celui de la caractérisation (Tunis). Elle avait pour objectif principal de mettre à la portée de l'agriculteur-éleveur au moins une variété de sulla local qui présente des atouts d'adaptation au milieu et qui résout les contraintes posées par le cultivar usuel Sgaravatti utilisé comme témoin dans tous les essais d'évaluation. Les critères de sélection comme la vigueur d'installation, les productions hivernale (janvier) et printanière (avril), le diamètre des tiges, la ramification, les taux de matière sèche et protéines brutes au stade floral, le rapport feuilles sur tiges..., ont été suivis. Par rapport à la moyenne des populations d'origine, la génération F4 qui englobait 17 génotypes a été caractérisée par des améliorations importantes des paramètres d'évaluation. Ainsi, la réponse à la sélection pour la production hivernale a été de 4,3 t/ha; le taux de protéines brutes au stade floraison augmenterait de 3,9 %; et encore la surface foliaire serait plus élevée de 322,1 cm²/plante.

L'évaluation des 17 géotypes de la génération F4 en comparaison avec le sulla Sgaravatti a montré l'existence de certains géotypes potentiels comme S1L1, S1L10 et S7L7. Dans ce cas, la production de matière sèche hivernale de S1L1 a été de 4,7 t/ha alors que Sgaravatti avait produit 1,2 t/ha. Au stade floraison, Sgaravatti a donné souvent un fourrage à faible taux de matière de sèche (14,6 %), ceci ne permet pas à la plante d'être conservée directement sous forme d'ensilage. Contrairement à S1L10 qui a atteint un taux de matière sèche de 25 %, avec 19 % de protéines brutes et une digestibilité *in sacco* de la matière organique de 82,4 %. L'étude du comportement fourrager des sullas sélectionnés entre 1996 et 1998 dans deux sites naturels différents qui sont le semi-aride à pluviosité variant de 350 à 450 mm (Tunis-INAT) et le subhumide Mateur, où la hauteur des pluies est plus importante (500-600 mm) a intéressé seulement 6 géotypes parmi 17 de la génération de sélection F4 (S1L10, S4L4, S7L7, S9L1, S10L4 et S14L6). Afin de compléter cette évaluation géotypique, d'autres paramètres ont été testés comme le pouvoir germinatif dans des conditions de stress salin et hydrique. Dans ces essais, le sulla Sgaravatti a été incorporé comme témoin.

Les conditions du semi-aride à pluviosité aléatoire ont été néfastes pour le sulla Sgaravatti. Sa production de 1^{ère} année de culture a été de 1,1 t/ha alors que S7L7 avait produit 9,2 t/ha. Ce comportement s'est poursuivi au cours de la deuxième année de culture mais avec un rétrécissement de l'écart entre les productions. En général, la production totale de deux années de culture et moyenne des deux sites (semi-aride et subhumide) a été de 13,2 t/ha pour Sgaravatti et 21,4 t/ha pour S7L7. Dans le semi-aride, les productions aussi bien énergétique que protéique ont été dérisoires avec le sulla Sgaravatti respectivement 1819 UFL/ha.an et 0,4 t/ha.an. Dans les mêmes conditions, le sulla S7L7 est arrivé à produire jusqu'à 6858 UFL/ha.an et 1,3 t/ha.an de protéines brutes.

Le suivi de la digestibilité *in sacco* de la matière sèche du fourrage produit par tous les géotypes a montré que les sullas sélectionnés ont été moins affectés par l'effet coupe. La plus faible perte de digestibilité entre la 1^{ère} et la dernière coupe a été obtenue avec S1L10 seulement -7,9 et -10,1 % en passant du semi-aride au subhumide.

Au stade germinatif, le sulla usuel Sgaravatti a présenté une mauvaise tolérance à la sécheresse simulée au PEG (polyéthylène glycol), avec un DL₅₀ de -0,8 bars. Alors que certains comme S7L7 et S14L6 se sont caractérisés par un DL₅₀ respectivement de -3,5 et -4,4 bars. Quant au facteur salinité du milieu de germination, encore le sulla S7L7 s'est montré le plus résistant à la présence de sel (NaCl) avec un DL₅₀ de 7,5 g/l suivi de S1L10 avec 6,1 g/l. Quant au sulla Sgaravatti, son DL₅₀ a été de 4,2 g/l. Ces résultats sont d'une importance capitale au cas où on projette la réintroduction du sulla dans des milieux classés marginaux.

Les acquis obtenus suite à l'évaluation du germoplasme sélectionné du sulla du nord local, ont montré une supériorité parfois indiscutable de certains géotypes comme S1L10 ou bien S7L7. Ce résultat a été atteint grâce à une diversité biologique fragile mais très importante. Désormais, ce nouveau matériel génétique est appelé à améliorer des systèmes de culture en déséquilibre avec l'environnement.

L'essai décennal (1990-1999) a intéressé 5 systèmes de rotation qui sont BBBB (blé dur (*Triticum durum* Desf.) en monoculture); JBBB (blé dur après une jachère); SSBB (2 années de sulla (*Hedysarum coronarium* L.) suivies de 2 années de blé dur); SSBC (2 années de sulla suivies de 1 année de blé dur suivie de 1 année de colza (*Brassica napus* L.)); et SSBF (2 années de sulla suivies de 1 année de blé dur suivie de 1 année de féverole (*Vicia faba* L. var. *minuta* (Hort. ex Alef.) Mansf.)). Il a été trouvé que les sols sous une monoculture de blé dur ont été confrontés à une minéralisation intense qui a fait perdre au sol 0,14 % de matière organique soit l'équivalent de 9,7 t/ha dans un horizon de sol de 0,6 m. Dans les mêmes conditions et en 10 ans, un accroissement significatif du taux de la matière organique du sol dans les systèmes de rotation à sulla a été observé. Il a varié de 0,76 à 0,8 % respectivement dans les systèmes SSBB et SSBF. Cette amélioration a été entraînée par une restitution au sol de résidus secs en fin de culture. Après deux années de culture, le sulla du nord a pu restituer au sol 9,2 t/ha de résidus secs. Dans les mêmes conditions, le blé n'avait fourni que 3,4 t/ha. En parallèle, l'approvisionnement du sol en azote est resté un élément fondamental dans la réussite de la production du blé après sulla. En 10 années, la consommation azotée moyenne des systèmes de rotation a varié selon la nature des cultures. Les systèmes BBBB; JBBB; SSBB; SSBC; et SSBF avaient consommé respectivement (120-120-120-120 kg/ha); (0-120-0-120 kg/ha); (0-0-0-53 kg/ha); (0-0-0-93 kg/ha); et (0-0-0-0 kg/ha) d'azote. Le blé dur suivant le sulla avait profité des restitutions azotées de cette culture évaluées à 226,8 kg/ha après deux années.

Quel que soit le système à sulla, le blé dur suivant a fait augmenter sa surface foliaire surtout en période de formation et de remplissage des grains. En début épiaison, la surface foliaire du blé dur a dépassé 550 cm²/plante alors qu'elle n'a été que de 250 cm²/plante dans un blé continu. En conséquence, le rendement du blé dur suivant le sulla a atteint 5,7 t/ha, contre 4,1 t/ha pour un blé en monoculture. En parallèle, la teneur en protéines des grains du blé dur a augmenté de 11,8 à 14,2 %, en passant respectivement du système BBBB au système SSBC. Dans le système de rotation SSBC, la production fourragère totale par cycle quadriennal a atteint 18600 UFL/ha et 3600 kg/ha de protéines brutes.

L'espèce *Hedysarum coronarium* L. comme ressource biologique naturelle sa vulnérabilité, sa préservation et son amélioration ont été discutés dans cette recherche. La sélection au sein de cette espèce dans le but de mettre au point des génotypes performants et améliorateurs de la production fourragère actuelle a aussi attiré notre intérêt. Le sulla en tant que Fabaceae fourragère a plusieurs rôles à jouer dans les systèmes de rotation principalement avec le blé. Cette composante de la recherche a été traitée afin de démontrer l'impact de l'espèce sur les systèmes de rotation tant sur les plans édaphique qu'agronomique. La multifonctionnalité du sulla du nord ne peut que projeter la conception de systèmes de rotation durables dans une agriculture en plein essor.

LES ABREVIATIONS

A	argile
BBBB	système blé continu
BSP	biomasse sèche printanière au stade floraison (avril)
BSH	biomasse sèche hivernale (janvier)
Ca	calcaire
CBH	cellulose brute hivernale (janvier)
CBP	cellulose brute printanière (avril)
CEC	capacité d'échange cationique
da	densité apparente
DE	stade début épiaison
DMO	digestibilité de la matière organique hivernale (janvier)
DMO	digestibilité de la matière organique printanière (avril)
DT	stade début tallage
DTP	diamètre des tiges
E	stade épiaison
FTH	rapport feuilles sur tiges hivernal (janvier)
FTP	rapport feuilles sur tiges printanier (avril)
F0	génération mère de sulla
F1	génération après 1 année de sélection
F2	génération après 2 années de sélection
F3	génération après 3 années de sélection
F4	génération après 4 années de sélection
G05	germination à 05°C
G20	germination à 20°C
G35	germination à 35°C
GP	stade grain pâteux
HPA	humus de la partie aérienne
HPS	humus de la partie souterraine
HVH	hauteur de végétation hivernale (janvier)
HVP	hauteur de végétation printanière (avril)
J<7°C	nombre de jours où les minima de température sont < 7°C
JB JB	système blé après jachère
K	potassium
L	stade levée
Lm	limon
LEF	longueur des étamines
LFM	longueur de la feuille médiane
LIF	longueur des inflorescences
LRF	longueur des rameaux au stade floraison
LTF	longueur des tiges au stade floraison
LTF	longueur finale de la tige principale
LTH	longueur de la tige principale hivernale
LTP	longueur de la tige principale printanière
M	plantes à tiges mixtes
Mt	stade montaison
MAT	matière azotée totale
MMH	matière minérale hivernale (janvier)
MMP	matière minérale printanière (avril)

MO	matière organique
MTP	matière primaire (grains, matière sèche fourragère)
MTS	matière secondaire (paille, fanes)
NEB	azote exporté par le blé
NFI	nombre des fleurs par inflorescence
NSO	azote du sol
Nt	azote total
NTE	azote total exporté par la plante
O	plantes à tiges orthotropes
P	plantes à tiges plagiotropes
P60	moyenne pluviométrique sur 60 ans
PA	partie aérienne
PBH	protéines brutes hivernales (janvier)
PB	protéines brutes printanières (avril)
PDIE	protéine digestible au niveau de l'intestin si l'énergie est limitante
PDIN	protéine digestible au niveau de l'intestin si l'azote est limitant
Ph	phosphore
Pl	pluie
PMG	poids de mille graines
PS	partie racinaire ou souterraine
S	sable
SFC	surface cotylédonaire
SFF	surface foliaire au stade floraison
SFH	surface foliaire hivernale
SFI	surface foliaire à l'installation
SFP	surface foliaire printanière
SFU	surface foliaire de la première feuille
SO	plante à tiges strictement orthotropes
SP	plantes à tiges strictement plagiotropes
SSBB	2 années de sulla suivies de 2 années de blé
SSBC	2 années de sulla suivies d'1 année de blé et d'1 année de colza
SSBF	2 années de sulla suivies d'1 année de blé et d'1 année de féverole
T	stade tallage
T60	moyenne des température sur 60 ans
TAF	longueur sur largeur de l'aile
TCF	longueur sur largeur de la carène
TCP	rapport longueur sur largeur cotylédonaire
TEF	longueur sur largeur de l'étendard
TFM	rapport longueur sur largeur des folioles
TGD	taux de graines dures à température optimale
TOG	température optimale de germination
TRF	nombre de rameaux au stade floraison
TRT	taux de ramification tertiaire
TSH	taux de matière sèche en hiver
TSP	taux de matière sèche au printemps
UFL	unité fourragère lait

LISTE DES TABLEAUX

N°	titre	page
1	Quelques valeurs nutritives du sulla en comparaison avec la luzerne et le bersim	16
2	Digestibilité des protéines brutes et matière organique du sulla Sgaravatti	17
3	Normes de qualité établies pour certaines semences fourragères certifiées	22
4	Taux maximum d'adventices tolérées dans les lots de semences fourragères	23
5	Récapitulation des effets de certaines fabacées (ns) sur le rendement en grains de céréales	45
6	Origine des sites géographiques de collecte des populations spontanées de <i>Hedysarum coronarium</i> L.	52
7	Spécificités physico-chimiques du sol du site de Tunis-INAT	55
8	Caractéristiques édapho-climatiques des sites expérimentaux de Tunis-INAT et Mateur	60
9	Modèle de tableau d'analyse de la variance des paramètres mesurés pour l'ensembles des géotypes sélectionnés F4 du sulla du nord	70
10	Dates de coupe des sullas dans les sites expérimentaux	75
11	Modèle de répartition des moyennes géotypiques selon l'environnement de l'essai	76
12	Spécificités générales du matériel biologique utilisé dans les systèmes de rotation	78
13	Durée en jours après semis des principaux stades agrobiologiques des variétés utilisées	79
14	Présentation des systèmes de rotation entre 1990 et 1999	79
15	Exportation des éléments majeurs N-P-K par tonne de matière produite (matière sèche fourragère, grain, graine, paille et fane) par les différentes cultures	81
16	Densités de semis des cultures dans les différentes soles	82
17	Estimation des quantités d'eau nécessitées (pluie et irrigation) par les différentes cultures entre le semis et la récolte	82
18	Calendrier d'exploitation des différentes cultures durant la décennie 1990-1999	84
19	Coefficients iso-humiques moyens (1990-1999) relatifs aux cultures pratiquées.	87
20	Répartition des populations prospectées du sulla du nord selon l'architecture du port des plantes	96
21	Classification des populations de sulla selon leur faculté germinative maximale atteinte à différentes températures	99
22	Carrés moyens de la germination des semences du sulla du nord à humidité variables après conservation à différentes températures	105
23a	Répartition des groupes (G) des populations spontanées de <i>Hedysarum coronarium</i> L. selon la moyenne des paramètres étudiés	110

N°	Titre	page
23b	Répartition des groupes (G) des populations spontanées de <i>Hedysarum coronarium</i> L. selon la moyenne des paramètres étudiés	111
23c	Répartition des groupes (G) des populations spontanées de <i>Hedysarum coronarium</i> L. selon la moyenne des paramètres étudiés	112
24	Index des principaux paramètres de sélection de <i>Hedysarum coronarium</i> L.	113
25	Prévision de la réponse moyenne à la sélection des génotypes de sulla après 4 cycles	115
26	Surfaces foliaires hivernale et printanière des génotypes de sulla après 4 cycles de sélection en comparaison avec Sgaravatti	118
27	Quelques caractéristiques liés au port de la plante des génotypes du sulla après 4 cycles de sélection en comparaison avec Sgaravatti	119
28	Evaluation de quelques paramètres indicatifs de la valeur nutritive du sulla après 4 cycles de sélection en comparaison avec Sgaravatti	121
29	Appréciation des paramètres de tolérance au sel DL ₅₀ et DG ₅₀ de quelques génotypes sélectionnés du sulla du nord au stade germinatif	125
30	Evaluation des paramètres de tolérance à un stress hydrique simulé DL ₅₀ et DG ₅₀ de quelques génotypes sélectionnés du sulla du nord au stade germinatif	128
31	Estimation de la tolérance des génotypes sélectionnés du sulla du nord aux stress hydrique et salin au stade germinatif en comparaison avec Sgaravatti	128
32	Potentiel de production en matière sèche au stade floral (t/ha), du sulla local amélioré de première année en comparaison avec Sgaravatti, dans les sites de Tunis-INAT et Mateur	129
33	Production de la matière sèche (t/ha) moyenne des deux sites Tunis-INAT et Mateur du sulla local amélioré en comparaison avec Sgaravatti au cours de la deuxième année de culture	130
34	Production totale (1 ^{ère} et 2 ^{ème} année) de la matière sèche (t/ha) moyenne des deux sites Tunis-INAT et Mateur du sulla local amélioré en comparaison avec le témoin Sgaravatti	132
35	Taux de digestibilité de la matière sèche du sulla local amélioré en comparaison avec le témoin Sgaravatti	133
36	Ecovalence environnementale des sulla dans les sites de Tunis-INAT et Mateur au cours de la première et deuxième année de culture	135
37	Potentiel de production énergétique (UFL/ha.an) du sulla local amélioré en comparaison avec le témoin Sgaravatti dans les sites de Tunis-INAT et Mateur	136
38	Potentiel de production protéique totale (t/ha) du sulla local amélioré en comparaison avec le témoin Sgaravatti dans les sites de Tunis-INAT et Mateur	137
39	Restitutions annuelles des résidus secs par les diverses cultures	139
40	Effet des rotations culturales sur la teneur du sol en matière organique	140

N°	Titre	page
41	Résidus azotés restitués annuellement au sol dans un horizon de 60 cm de profondeur et exportations d'azote par chaque culture incorporée dans les systèmes de rotation durant la décennie 1990-1999	142
42	Production totale des systèmes de rotation par cycle de 4 ans durant la décennie 1990-1999	146
43	Teneur moyenne en protéines des grains de blé dur dans les divers systèmes de rotation durant la décennie 1990-1999	149

LISTE DES FIGURES

N°	titre	page
1	Plantule de Sulla du nord (Bikra 21) au stade 1 ^{ère} feuille unifoliolée avec graines en gousse articulée et décortiquée	6
2	Tige fleurie du sulla du nord (<i>Hedysarum coronarium</i> L.) avec les différentes parties de la fleur et de la gousse	7
3	Répartition des groupements botaniques à sulla du nord spontané selon la carte bioclimatique de la Tunisie septentrionale	8
4	Groupement spontané <i>Hedysarum coronarium</i> L. et <i>Chrysanthemum coronarium</i> L. sur sol marneux à Oudna dans le semi aride supérieur de la Tunisie (avril, 2004)	10
5	Type de sol à marne préféré par le sulla du nord dans la région de Ain Ghélal dans le semi-aride supérieur de la Tunisie	12
6	L'abeille <i>Apis mellifera</i> L. principal pollinisateur du sulla du nord	13
7	Exploitation progressive du sulla du nord (Bikra 21) par fauche manuelle à Ain Ghélal (nord tunisien) en novembre 2002	14
8	Parcelle de sulla du nord (Bikra 21) à fleurs rouges envahie par le faux fenouil (<i>Ridolfia segetum</i> (L.) Moris) et le chardon (<i>Carduus pycnocephalus</i> L.) (Station expérimentale de l'INAT à Mornag, avril 2004)	19
9	Schéma de sélection récurrente phénotypique individuelle et familiale demi-frère	26
10	Répartition des sites de collecte des sullas spontanés (Si) dans la Tunisie septentrionale	49
11	Système architectural des tiges des populations du sulla spontané	51
12	Diversité architecturale des tiges dans l'espèce <i>Hedysarum coronarium</i> L.	51
13	Répartition mensuelle de la hauteur des pluies (mm) et de la température (°C) moyennes sur 60 années (1929-1989) du site expérimental de Tunis-INAT	56
14	Comparaison de la température moyenne annuelle de la décennie 1990-1999 par saison de la station de Tunis-INAT avec la température moyenne sur 60 ans (T60)	57
15	Variation de la hauteur moyenne des pluies annuelles par saison de la station de Tunis-INAT durant la décennie 1990-1999 par rapport aux moyennes des pluies sur 60 ans (P60)	58
16	Répartition mensuelle de la hauteur des pluies (mm) et de la température (°C) moyennes sur 60 années (1929-1989) du site expérimental de Mateur	60
17	Schéma de sélection récurrente phénotypique individuelle et familiale demi-frères sur 4 générations des populations du sulla sauvage (<i>Hedysarum coronarium</i> L.)	64
18	Présentation schématique des unités expérimentales de chaque système de rotation	80

N°	Titre	page
19	Répartition des populations spontanées de sulla du nord selon les bioclimats (Bortolli <i>et al.</i> , 1967) de la Tunisie septentrionale	94
20	Répartition des populations spontanées de sulla du nord selon la nature des sols (Belkhoja <i>et al.</i> , 1976) dans la Tunisie septentrionale	95
21	Variation du poids de mille graines entre les diverses populations du sulla du nord sauvage	97
22	Effet des teneurs en matière organique des sites de collecte sur la variation du poids de mille graines des populations du sulla local	98
23a	Effet de la température sur la variation germinative des sullas par rapport au G25	100
23b	Effet de la température sur la variation germinative des sullas par rapport au G25	101
23c	Effet de la température sur la variation germinative des sullas par rapport au G25	102
24	Taux de graines dures des populations de sulla à la température induisant le maximum de germination	103
25	Germination des semences de quelques espèces fourragères conservées à température ambiante au Laboratoire de Productions Fourragère et Pastorale, INA Tunisie	104
26	Evolution dans le temps (selon une échelle logarithmique) de la germination des graines de <i>Hedysarum coronarium</i> L. à humidité (Hg) variable après conservation à différentes températures	106
27	Projection plane des trois principaux axes discriminants avec les 27 populations sauvages du sulla du nord et leurs variables d'évaluation	108
28	Dendrogramme de similarité des populations sauvages du sulla du nord selon les distances euclidiennes	109
29	Distribution des biomasses sèches hivernale (janvier) et printanière (avril) des sullas après 4 cycles de sélection en comparaison avec le témoin T (Sgaravatti)	117
30	Durée en jours de la période semis- floraison des sullas sélectionnés	120
31	Evolution de la germination des géotypes sélectionnés du sulla du nord en fonction de la salinité du milieu	124
32	Evolution de la germination des géotypes sélectionnés du sulla du nord en fonction d'une sécheresse simulée	127
33	Variation selon les coupes du potentiel productif en matière sèche des géotypes du sulla local amélioré de deuxième année dans les deux sites expérimentaux Tunis-INAT et Mateur en comparaison avec le témoin Sgaravatti	131
34	Variation de la production totale en matière sèche digestible de 1 ^{ère} et 2 ^{ème} année de culture des sullas dans les deux sites de Tunis-INAT et Mateur en comparaison avec le témoin Sgaravatti	134
35	Moyenne annuelle des résidus secs aériens (PA) et racinaire (PS) restitués par les systèmes de rotation durant la décennie 1990-1999	139
36	Estimation de la matière humique produite annuellement par les parties aérienne (HPA) et racinaire (HPS) des différents systèmes de rotation durant la décennie 1990-1999	141

N°	titre	page
37	Restitutions azotées au sol moyennes annuelles (NSO) par les systèmes de rotation comparées aux exportations azotées respectives (NTE) durant la décennie 1990 et 1999	143
38	Evaluation de la production moyenne annuelle des systèmes de rotation répartie en matière première (MTP) sous forme de grains ou fourrage sec et matière secondaire (MTS) sous forme de paille ou fanes durant la décennie 1990-1999	145
39	Production énergétique totale des systèmes de rotation par cycle de 4 ans exprimée en UFL durant la décennie 1990-1999	147
40	Production totale des protéines par cycle de 4 ans des systèmes de rotation durant la décennie 1990-1999	148
41	Variation de l'exportation azotée du blé en fonction des résidus laissés par le précédent cultural dans un cycle triennal	150
42	Evolution de la surface foliaire du blé (cm ² /par plante) dans les systèmes de rotation durant la décennie 1990-1999	151
43	Evaluation de l'effet précédent cultural sur le rendement en grains du blé comparé au témoin blé continu	152

INTRODUCTION GENERALE

En Tunisie, le déséquilibre quasi permanent entre les besoins alimentaires du cheptel et les offres des ressources fourragères et pastorales constitue une situation chronique de l'élevage qui représente aujourd'hui 33 % en valeur de la production agricole (Zouaghi, 1998). Le fourrage cultivé ne satisfait que 18 % des besoins énergétiques du cheptel estimé à près de 5 milliards d'unités fourragères lait (Zouaghi, 2001). Les agro-systèmes abritent en tout moins de 15 % de l'effectif total du cheptel. Ces systèmes pratiquent très faiblement les cultures fourragères qui ne représentent que 7 % des surfaces agricoles utiles dominées par les céréales. En conséquence, une forte pression de pâturage s'exerce sur les parcours naturels et les couverts forestiers, engendrant une forte dégradation de la diversité biologique fourragère et pastorale. Ce phénomène est accentué au cours des années de déficit pluvial au cours desquelles les espèces les plus tolérantes à la sécheresse sont décimées.

Parmi les espèces pastorales les plus intéressantes, le sulla du nord (*Hedysarum coronarium* L.) se trouve actuellement en très forte régression dans l'ensemble des sites prospectés. Cette dernière vient d'être inscrite sur la liste des espèces menacées (Zouaghi, 1998). De nombreuses autres fabacées fourragères susceptibles d'être cultivées dans les systèmes fourragers comme la luzerne (*Medicago sativa* L.), le bersim (*Trifolium alexandrinum* L.), la fêverole (*Vicia faba* L. var. *minuta* (Hort. ex Alef.) Mansf.) ou de graminées telles le ray-grass annuel (*Lolium multiflorum* Lam.), la fétuque (*Festuca arundinacea* Schreb.), l'alpiste (*Phalaris bulbosa* L.) et d'autres comme le colza (*Brassica napus* L.) ainsi que leurs techniques d'installation et d'utilisation sont connues depuis des décennies (Thiault, 1957; Lapeyronie, 1982; Zouaghi, 1987; Ben Jeddi *et al.*, 1992). Cependant, en raison du manque de variétés adaptées, seule l'avoine (*Avena sativa* L.) domine les systèmes fourragers en occupant plus de 75 % des superficies fourragères emblavées annuellement. Cette très faible contribution des fabacées à l'amélioration des systèmes fourragers a entretenu les faiblesses des agro-systèmes nationaux à trois niveaux au moins:

- les fourrages produits par les systèmes fourragers sont nutritionnellement déséquilibrés aussi bien en énergie qu'en protéines. Ils sont restés inaptes à répondre aux besoins de l'élevage bovin moderne développé depuis les années '60. Cette situation revêt un caractère grave surtout en années à faible pluviométrie au cours desquelles les importations massives d'aliments pour le bétail deviennent inévitables;
- les systèmes de culture actuels basés largement sur la monoculture, ont accentué l'érosion des terres marneuses les plus fragiles et ont contribué à leur appauvrissement en matière organique; affaiblissant leur fertilité et augmentant leur sensibilité aux irrégularités climatiques; et
- les systèmes de monoculture faisant de plus en plus appel aux engrais chimiques, aux herbicides et aux semences améliorées ont vu leur coût de production augmenter et leur efficacité énergétique diminuer (Ferrière *et al.*, 1997), suite à une mauvaise valorisation des intrants par la culture.

Introduction générale

Ces contraintes de diverses natures incitent à poser des questions et à établir des hypothèses de travail en relation avec le rôle des fabacées et spécialement le sulla du nord (*Hedysarum coronarium* L.) dans l'amélioration de l'efficacité et de la durabilité des systèmes de rotation dans la Tunisie septentrionale. Dans le présent travail, nous envisageons de :

- sauvegarder et promouvoir les ressources phytogénétiques de l'espèce *Hedysarum coronarium* L. menacée de disparition;
- sélectionner parmi les populations locales du sulla les géotypes prometteurs, et les évaluer dans des conditions de culture différentes; et
- étudier le rôle et l'efficacité du sulla dans divers systèmes de rotation ainsi que son impact sur les composantes édaphiques et agronomiques du système.

Ce travail est ainsi présenté en quatre parties qui sont:

- Partie 1: Revue bibliographique.
- Partie 2: Matériels et méthodes.
- Partie 3: Résultats et interprétations.
- Partie 4: Conclusions, discussions et perspectives.

L'analyse bibliographique présentera l'espèce *Hedysarum coronarium* L., ses exigences naturelles, son potentiel de production fourragère et sa qualité nutritionnelle. Les notions de base liées à la diversité biologique, sa valorisation, sa conservation (Dale, 1991) et son intérêt dans le domaine de l'amélioration des plantes seront traités dans cette partie. En Tunisie, Cette diversité biologique riche mais très fragile connue depuis près d'un siècle (Gagey, 1912) est aujourd'hui vulnérable et se trouve fortement menacée. Nous traiterons ensuite le système de sélection adapté aux espèces allogames comme le sulla. De même, l'étude de l'interaction génotype-environnement sera étudiée en raison de son rôle capital pour la réussite et l'intégration de la plante dans les systèmes de culture (Cooper et Hammer, 1996). Les effets des systèmes visant la monoculture seront discutés dans cette partie en comparaison avec d'autres incluant les fabacées fourragères comme des améliorateurs connus de la fertilité des sols (Kpombrekou et Tabatabai, 1997) avec l'utilisation des cultures dites (piège à nitrates) comme le colza (*Brassica napus* L.) (Morvan *et al.*, 2000).

La deuxième partie méthodologique commence par l'identification et la caractérisation des sites de collecte du germoplasme sulla du nord spontané et son évaluation selon des paramètres de caractérisation agro-morphologique adaptée à l'espèce.

Introduction générale

Nous donnerons ensuite les critères et le modèle de sélection adopté. Nous décrirons alors les paramètres des essais d'évaluation qui ont été conduits dans deux sites bioclimatiques différents (semi-aride et subhumide). Dans ce cadre, nous étudierons les influences des facteurs du milieu sur les paramètres d'évaluation. Enfin, nous testerons le sulla dans des systèmes de rotation différents dans le but d'analyser ses arrières-effets comme précédent cultural pour le blé dur (*Triticum durum* Desf.).

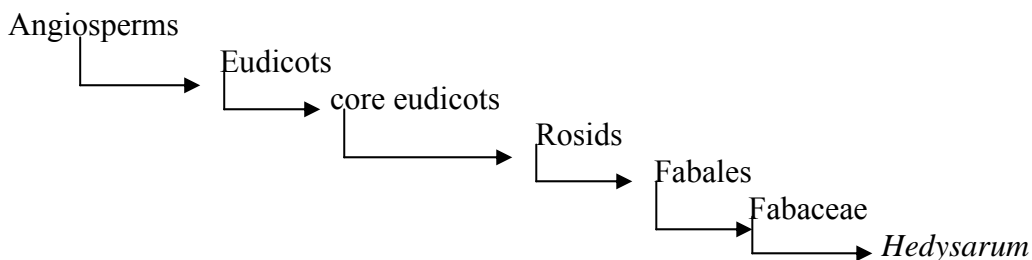
Enfin, Nous discuterons les résultats de l'intérêt de la diversité génotypique du sulla du nord dans l'amélioration variétale. L'évaluation du nouveau matériel génétique en relation avec l'environnement sera étudiée dans le but de sélectionner le ou les génotypes les plus performants. L'impact de cette espèce sur les composantes de production de divers systèmes de rotation installés entre 1990 et 1999, sera aussi analysé en comparaison avec le système conventionnel de blé en continu ou de blé après une jachère.

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

1. PRESENTATION DE *Hedysarum coronarium* L.

1. 1. Répartition géographique de l'espèce

Le sulla du nord ou sainfoin d'Espagne dénommé *Hedysarum coronarium* L. dans les flores est une espèce qui a été classée selon APG, (1998) comme suit :



L'aire de distribution du genre *Hedysarum* est l'Europe tempérée, les régions méditerranéennes de l'Afrique du nord (Polunin, 1969; Hyam et Pankhurst, 1995), l'Asie mineure, la Sibérie et l'Amérique du nord, à partir de l'Arizona jusqu'au Canada et les régions arctiques (Bentham et Hooker, 1865; Rollins, 1940).

Quant à l'espèce *coronarium*, elle est rencontrée en Afrique du nord. En Tunisie, sa présence a été signalée dans toute la zone nord de la dorsale à partir de 300 mm de pluie par an (Ben Jeddi *et al.*, 1998). En Algérie, l'aire de distribution de l'espèce est limitée en raison de la forte dégradation voire même la disparition des prairies naturelles (Abdelguerfi, 1989). Au Maroc, le sulla n'est pas aussi répandu comme la luzerne (*Medicago sativa* L.) ou le bersim (*Trifolium alexandrinum* L.). Cependant, certaines populations ont été signalées dans la zone nord du pays comme la région de Tanger (Ameziane et Berkat, 1989). L'espèce ne s'étend pas vers les régions du sud de la dorsale tunisienne. Ainsi le sulla du nord n'est pas signalé ni en Libye ni en Egypte. En Europe méditerranéenne, le sulla se rencontre en Espagne, Italie (Le Houerou, 1965), Sicile, Malte et Iles Baléares (Semadeni, 1976) où il est moins tolérant au froid que le sainfoin (*Onobrychis viciifolia* Scop.) malgré l'existence de certains types d'altitude (Rios *et al.*, 1992).

1. 2. Description botanique du sulla du nord

Au stade plantule, les cotylédons du sulla sont ovales, arrondis, presque sessiles de dimensions 10x7,8 mm et glabres. Les trois ou quatre premières feuilles sont longuement pétiolées, entières, orbiculaires ou elliptiques (Baatout *et al.*, 1976).

Les feuilles sont formées de 3 à 5 paires de folioles ovales, grandes (2-4x1-2,5 cm). Les fleurs sont longues de 14 à 20 mm en grappes allongées, denses et longuement pédonculées. Les gousses sont droites, larges de 4 à 5 mm, à articles couverts d'aiguillons (Quezel et Santa, 1962).

La graine est réniforme ou discoïde avec un tégument lisse et luisant et uniformément coloré en jaune clair parfois noir; il brunit en vieillissant (Semadeni, 1976) (figure 1).

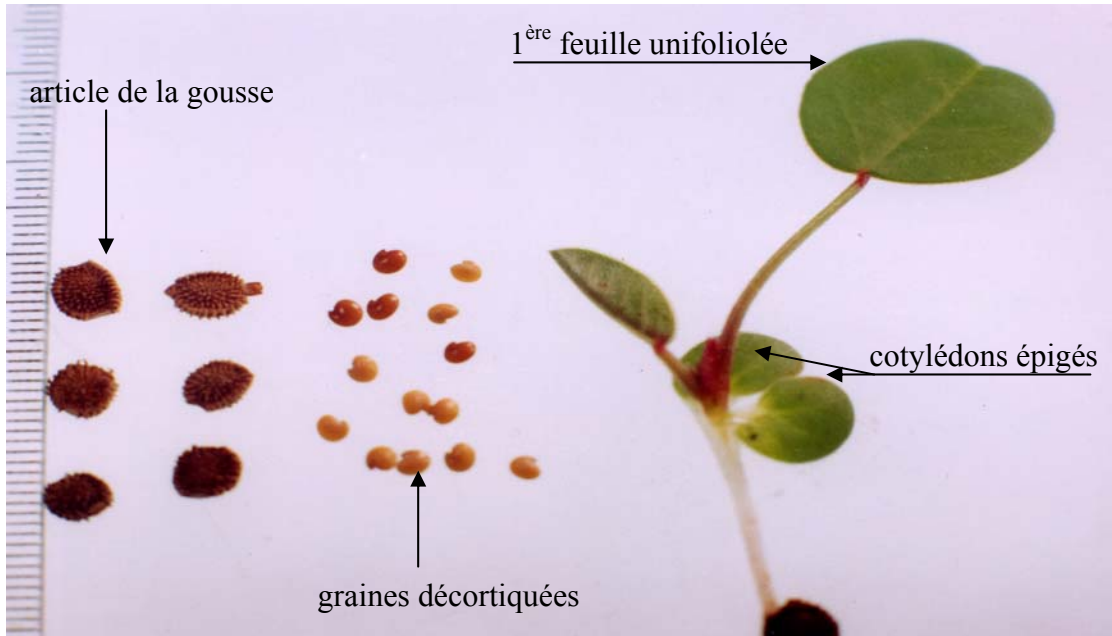


Figure 1 Plantule de Sulla du nord (Bikra 21) au stade 1^{ère} feuille unifoliolée avec graines en gousse articulée et décortiquées (Ben Jeddi, 2002)

La couleur de la face supérieure des feuilles est du vert foncé et est glabre, tandis que la face inférieure et le pétiole sont soyeux par des poils appliqués. Au stade végétatif, la plantule se trouve en rosette lâche (Clarde, 1990) et est sensible au froid, à l'excès d'eau et à la concurrence des adventives (Semadeni, 1976). En Tunisie, il est conseillé d'installer la culture tôt en automne (maximum 15 novembre) pour que la plante acquière une croissance suffisante avant l'arrivée du froid (Ben Jeddi, 2002).

Les tiges du sulla du nord sont robustes et dressées dans les sols profonds et rampantes dans les rochers calcaires et les schistes où il végète à l'état spontané (Bigourdan, 1933 et Baatout *et al.*, 1976), de 10 à plus de 100 cm de long. Les populations de sulla sont partagées en groupes à tiges orthotropes, plagiotropes ou semi-plagiotropes (Sarno *et al.*, 1978). La hampe florale comporte de grandes fleurs rouges pourpres, en grappes denses à long pédoncule. La corolle est de 10 à 15 mm de long (figure, 2). Baatout *et al.* (1976) ont trouvé très peu d'individus à fleurs roses ou même franchement blanches. La variabilité courante de ce caractère s'étend du rouge vif au violet. Selon la région bioclimatique, la floraison est répartie entre mars et juin (Bigourdan, 1933 et Clarde, 1990). Sarno *et al.* (1978) ont montré que les populations d'altitude tendent à fleurir tardivement et sont par conséquent plus sensibles à l'oïdium (*Erysiphe trifolii* var. *intermedia* (U. Braun) (U. Braun et S. Takam)).

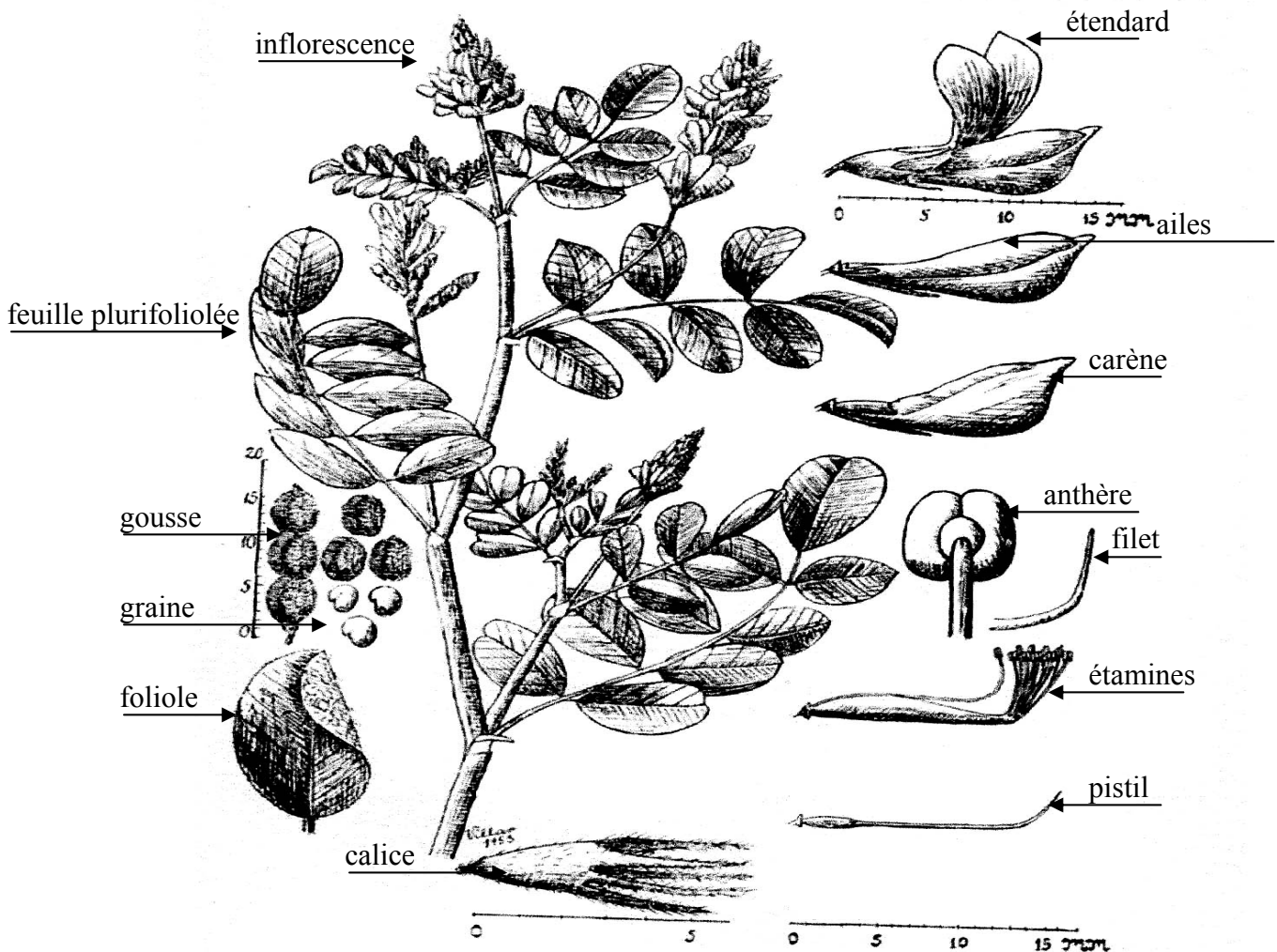


Figure 2 Tige fleurie du sulla du nord (*Hedysarum coronarium* L.) avec les différentes parties de la fleur et de la gousse (Villax, 1963)

1. 3. Eco-systèmes à sulla du nord

La consultation des cartes phyto-écologiques de la Tunisie septentrionale (Bigot *et al.*, 1967; Gounot *et al.*, 1966; Floret *et al.*, 1967a; Floret *et al.*, 1967b; Jacquinet et Soler, 1967) a montré une grande diversité des sites incluant *Hedysarum coronarium* L. comme espèce dominante dans des associations diverses. Les groupements végétaux ont été décrits selon les étages bioclimatiques de la Tunisie (Bortolli *et al.*, 1967). La nomenclature des espèces a été mise au point selon la flore établie par Quezel et Santa, (1962). Pour les présenter, nous avons suivi l'ordre adopté par ces auteurs lors de l'élaboration de la carte phyto-écologique du nord de la Tunisie.

1. 3. 1. Etage de végétation humide

- groupement PC: *Hedysarum coronarium* L., *Picris echioides* L. et *Centaurea solstitialis* L. ssp. *schouwii* (DC.) Dostal.
- groupement CA: *Hedysarum coronarium* L., *Ammi visnaga* (L.) Lam. et *Centaurea solstitialis* L. ssp. *schouwii* (DC.) Dostal.
- groupement PCF: *Hedysarum coronarium* L., *Picris echioides* L., *Centaurea solstitialis* L. ssp. *schouwii* (DC.) Dostal et *Salvia argentea* L. ssp. *patula* (Desf.) Maire.
- groupement PCC: *Hedysarum coronarium* L., *Picris echioides* L., *Centaurea solstitialis* L. ssp. *schouwii* (DC.) Dostal et *Cynara cardunculus* L. (figure 3).

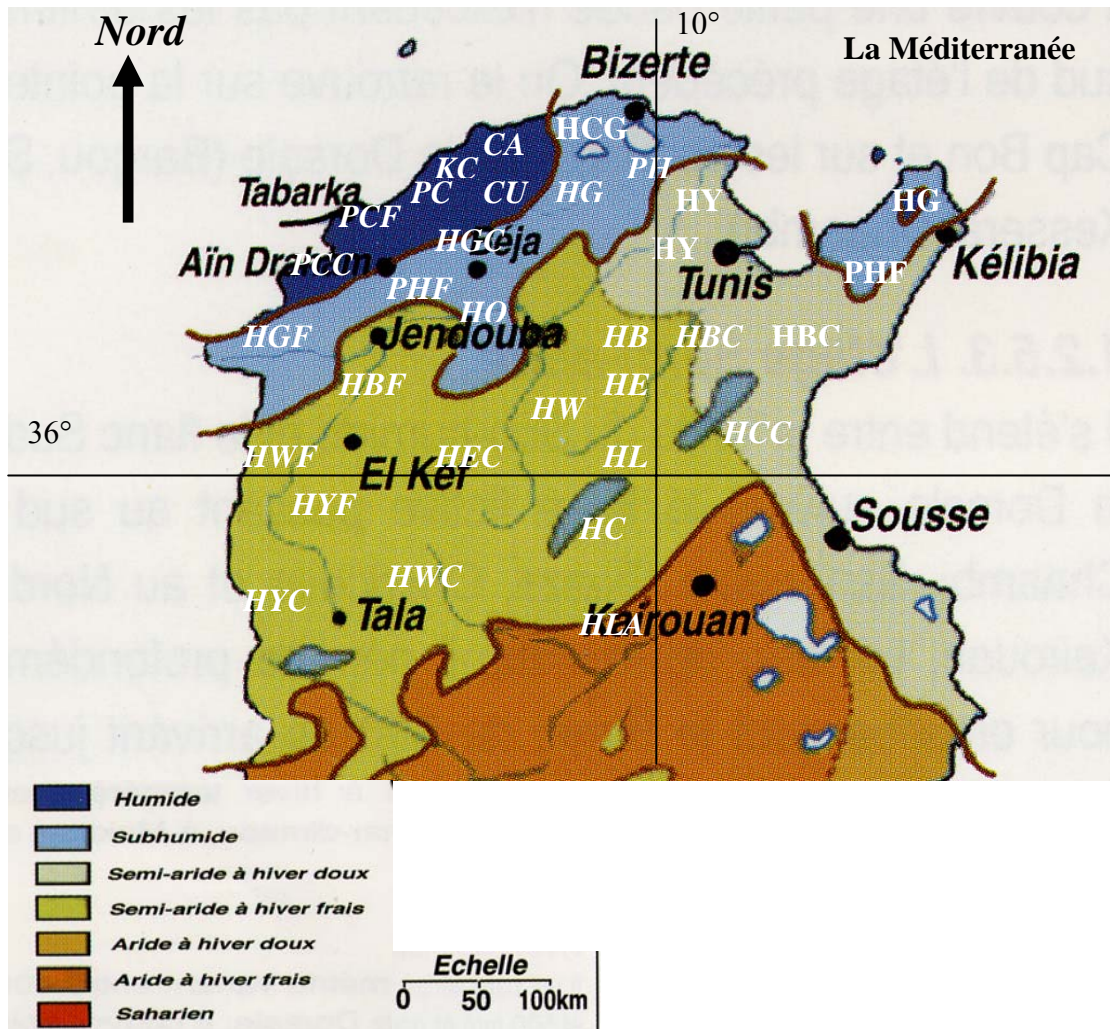


Figure 3 Répartition des groupements botaniques à *Hedysarum coronarium* L. spontanée selon la carte bioclimatique de la Tunisie septentrionale (Bortolli *et al.*, 1967)

- groupement KC: *Hedysarum coronarium* L., *Kremeria myconis* (L.) Maire et *Centaurea solstitialis* L. ssp. *schouwii* (DC.) Dostal.
- groupement CU: *Hedysarum coronarium* L., *Picris echioides* L., *Hypericum crispum* L. et *Centaurea solstitialis* L. ssp. *schouwii* (DC.) Dostal.

1. 3. 2. Etage de végétation subhumide

- groupement HG: *Hedysarum coronarium* L., *Picris echioides* L. et *Galactites tomentosa* (L.) Moench.
- groupement HCG: *Hedysarum coronarium* L., *Chrysanthemum coronarium* L. et *Galactites tomentosa* (L.) Moench.
- groupement PH: *Hedysarum coronarium* L., *Picris echioides* L., *Hypericum crispum* L. et *Galactites tomentosa* (L.) Moench.
- groupement HO: *Hedysarum coronarium* L. et *Lithospermum arvense* L. ssp. *glabrum* Koch.
- groupement HGF: *Hedysarum coronarium* L., *Picris echioides* L. et *Catananche coerulea* L.
- groupement HGC: *Hedysarum coronarium* L., *Picris echioides* L. et *Galactites tomentosa* (L.) Moench.
- groupement PHF: *Hedysarum coronarium* L., *Picris echioides* L., *Hirschfeldia incana* L. ssp. *geniculata* (Desf.) Maire et *Catananche coerulea* L.

1. 3. 3. Etage de végétation semi-aride supérieur

- groupement HB: *Hedysarum coronarium* L., *Picris echioides* L. et *Bupleurum lancifolium* Hornem.
- groupement HY: *Hedysarum coronarium* L., *Chrysanthemum coronarium* L. et *Bupleurum lancifolium* Hornem.
- groupement HW: *Hedysarum coronarium* L., *Picris echioides* L. et *Hypericum crispum* L.
- groupement HE: *Hedysarum coronarium* L. et *Echinops strigosus* L.
- groupement HBF: *Hedysarum coronarium* L., *Picris echioides* L. et *Salvia argentea* ssp. *patula* (Desf.) Maire.
- groupement HWF: *Hedysarum coronarium* L., *Picris echioides* L., *Hirschfeldia incana* L. et *Salvia argentea* ssp. *patula* (Desf.) Maire.
- groupement HEC: *Hedysarum coronarium* L., *Echinops strigosus* L. et *Cynara cardunculus* L.
- groupement HBC: *Hedysarum coronarium* L., *Picris echioides* L., *Bupleurum lancifolium* Hornem. et *Cynara cardunculus* L.
- groupement HYF: *Hedysarum coronarium* L., *Hirschfeldia incana* L. ssp. *geniculata* (Desf.) Maire, *Bupleurum lancifolium* Hornem. et *Salvia argentea* ssp. *patula* (Desf.) Maire.

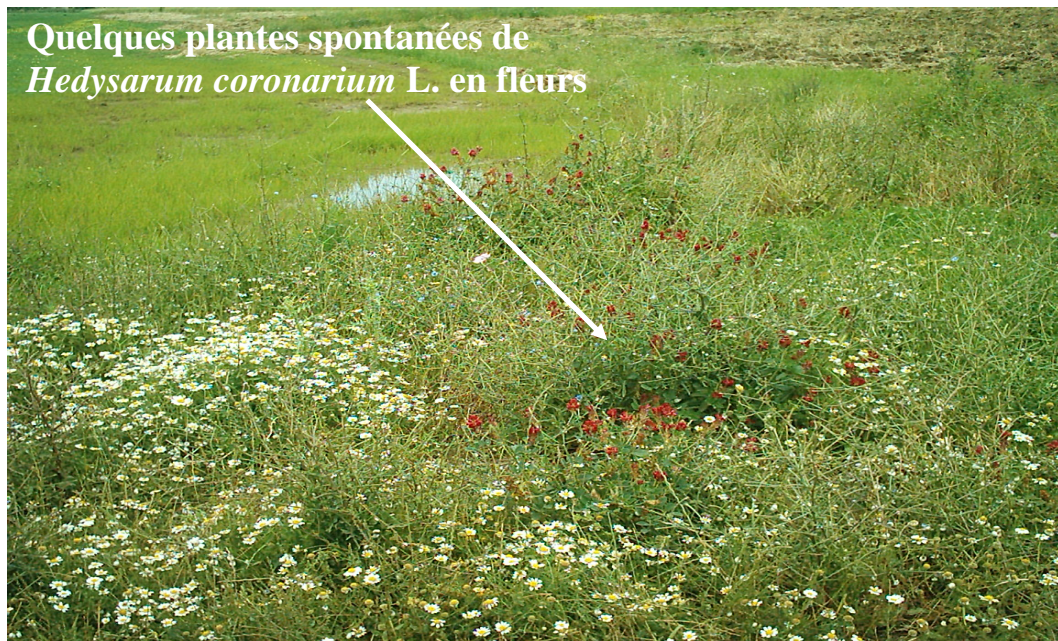


Figure 4 Groupement spontané *Hedysarum coronarium* L. et *Chrysanthemum coronarium* L. sur sol marneux à Oudna dans le semi aride supérieur de la Tunisie (avril, 2004)

- groupement HYC: *Hedysarum coronarium* L., *Chrysanthemum coronarium* L., *Bupleurum lancifolium* Hornem. et *Cynara cardunculus* L.
- groupement HWC: *Hedysarum coronarium* L., *Picris echioides* L., *Hypericum crispum* L. et *Cynara cardunculus* L.

1. 3. 4. Etage de végétation semi aride inférieur

- groupement HLC: *Hedysarum coronarium* L., *Echinops strigosus* L. et *Cynara cardunculus* L.
- groupement HL: *Hedysarum coronarium* L., *Launaea nudicaulis* (L.) Hook. f. et *Echinops strigosus* L.
- groupement HC: *Hedysarum coronarium* L., *Chrysanthemum coronarium* L. et *Launaea nudicaulis* (L.) Hook. f.
- groupement HLA: *Hedysarum coronarium* L., *Lygeum spartum* L. et *Artemisia campestris* L.

Cette distribution florale de *Hedysarum coronarium* L. selon un spectre bioclimatique très étendu prouve une rusticité et une souplesse d'adaptation caractérisant l'espèce. Cette diversité est d'un grand intérêt pour les programmes visant l'amélioration des ressources phytogénétiques sauvages.

2. EXIGENCES NATURELLES ET POTENTIEL FOURRAGER DE *Hedysarum coronarium* L.

2. 1. Aperçu historique

Depuis 1905, de nombreux professeurs de l'ECAT (Ecole Coloniale d'Agriculture de Tunis) actuellement INAT (Institut National Agronomique de Tunisie) ont préconisé la culture du sulla du nord. Les mérites de cette espèce sont reconnus depuis longtemps et de nombreux agriculteurs ont amélioré leurs systèmes de culture après l'avoir introduit comme ressource fourragère.

En 1904, Boeuf et Tournieroux reprochaient au sulla de ne pas pouvoir se développer dans un sol où il n'est pas spontané. Ceci est dû à l'absence de son *Rhizobium* spécifique (*Rhizobium sullae* Squartini *et al.*, 2000, sp. nov.) inconnu à l'époque.

Jusqu'à 1930, les échecs d'installation de la culture aboutissaient à son abandon complet.

Depuis 1933, certains colons de la région subhumide tunisienne semaient le sulla d'une manière très localisée spécialement comme foin pour leurs chevaux de trait (Bigourdan, 1933).

En 1954, les professeurs de l'ECAT introduisaient de l'Italie la première variété de sulla Sgaravatti 1187 pour des essais où elle a montré une certaine adaptation.

En 1976, d'autres variétés (Sparacia de Sicile) ont été importées par des organismes officiels comme l'OEP (Office de l'élevage et des pâturages).

En 1977, une autre variété Grimaldi a été introduite et multipliée chez les agriculteurs sous le contrôle de l'OEP.

Depuis, d'autres importations de sulla italien ont été réalisées jusqu'à 2000 pour satisfaire les besoins du marché en semences. Cependant, ces dernières introductions ne comportaient aucune précision variétale donc, peuvent être considérées comme des semences foraines.

2. 2. Préférences édaphiques du sulla du nord

Le sulla du nord est considéré comme une espèce pratiquée dans les cultures annuelles et les pâturages sur marnes argileuses, ainsi que sur sols bruns calcaires ou bruns lessivés et rendzines (Clarde, 1990).

En Tunisie, il se trouve à l'état spontané sur les marnes (figure 5) et les terres argilo-calcaires. Certains types de sulla se trouvent à des altitudes supérieures à 2000 m (Bentham et Hooker, 1865).

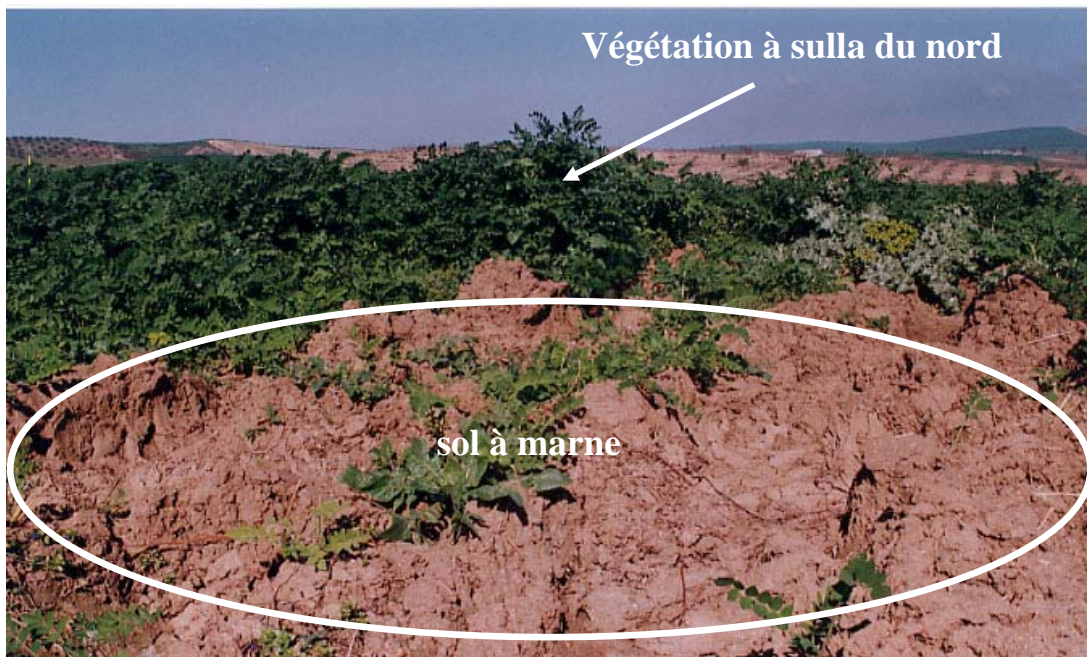


Figure 5 Type de sol à marne préféré par le sulla du nord dans la région de Ain Ghélal dans le semi-aride supérieur de la Tunisie (Ben Jeddi, 2002)

Ben Jeddi *et al.*, (1998) ont signalé la présence de populations spontanées sur des hauteurs allant jusqu'à 1200 m comme celles de Makthar et Théla (centre-ouest tunisien). Dans les terres pauvres, compactes et dégradées l'espèce peut jouer le rôle de plante pionnière et améliorer ainsi la fertilité du sol pour la culture suivante (Ballatore, 1972; Granier, 1966).

2. 3. Mode de reproduction et pollinisation chez le sulla du nord

Le sulla du nord (*Hedysarum coronarium* L.) est une espèce allogame (Grimaldi, 1961) à pollinisation croisée de type entomophile. Les principaux pollinisateurs sont les abeilles qui facilitent aussi l'autofécondation (Free, 1993). Pinzanti et Magnani (1981) ont montré aussi que la présence d'insectes est nécessaire aussi bien pour la fécondation croisée que l'autofécondation.

Chriki (1982) a montré que dans des conditions naturelles, le taux d'autogamie chez le sulla se situe entre 7 et 17 % soit une moyenne qui avoisine les 10 %. Dans ce cas, le stigmate reçoit 4 fois plus d'auto-pollen que d'allo-pollen. Or, en pollinisation artificielle avec castration des fleurs, où le stigmate reçoit la même proportion d'allo-pollen et d'auto-pollen (1/1) le taux d'autogamie n'est pas significativement différent des fleurs non castrées.



Figure 6 L'abeille *Apis mellifera* L. principal pollinisateur du sulla du nord

Selon Chriki (1982), la fécondation de la fleur par un type donné de pollen ne dépend pas de sa densité mais des réactions biochimiques (style/pollen) déterminant l'auto-incompatibilité. Pour cela, il a exploité le facteur pigmentation des fleurs pour mettre en évidence la variation du taux d'autogamie chez le sulla. Dans un croisement libre, le taux d'autogamie obtenu est de 10,75 % (10/93 plantes à fleurs blanches issues de l'auto-pollen). Pratiquement le même taux a été obtenu avec un croisement artificiel (4/43). Ce résultat est important dans la mesure où les croisements peuvent être réalisés sans avoir recours à la castration des fleurs. La compétition existant entre l'allo-pollen et l'auto-pollen est de ce fait responsable du faible degré d'autogamie noté chez le sulla du nord. Sonet et Jacob-Renacle (1987) ont trouvé le même mécanisme de pollinisation chez le sulla.

Il est à préciser que le locus (S) responsable de l'incompatibilité ne présente pas de liaison génétique avec les gènes de coloration A et B. La pollinisation d'une forme maternelle de sulla à fleurs blanches (absence de pigmentation) et de préférence castrées, avec un mélange de pollen provenant de deux formes paternelles différentes, l'une à fleurs blanches et l'autre à fleurs rouges a donné une descendance ayant la même proportion de fleurs pigmentées (rouges) et non pigmentées (blanches). Donc les deux types de pollen ont la même probabilité de féconder l'oosphère (Chriki, 1982).

2. 4. Potentiel fourrager du sulla du nord

Le sulla est une espèce fourragère non météorisante et est pâturée par des animaux ruminants ou non (Bassendowski *et al.*, 1989). Elle était cultivée pour l'alimentation des chevaux; mais elle a aussi une place de choix dans la production de verdure pâturée (Rondia, *et al.* 1985).

L'herbe produite convient à l'élevage ovin et bovin (Ballatore, 1972). En Tunisie, le pâturage de sulla de première année peut commencer de fin février jusqu'à fin avril (2 passages) (Rondia *et al.*, 1985). La précocité des repousses de la deuxième année dépend de la date des précipitations automnales. Dans la partie septentrionale de la Tunisie et en année à pluviométrie moyenne, le sulla local amélioré Bikra 21 de 2^{ème} année peut être pâturé de novembre jusqu'à avril (Ben Jeddi, 2001). Ballatore (1963) a estimé la charge de pâturage de 10 à 12 brebis par hectare, un chiffre qui convient bien à la Tunisie septentrionale (Rondia, 1985). Stringi *et al.* (1991) ont montré qu'en Sicile, le sulla peut être pâturé à partir de mi-février jusqu'à fin mai. Certains auteurs, déconseillent le pâturage d'automne durant lequel la plante forme de nouvelles ramifications. Cette technique peut réduire la densité des plantes et par conséquent le rendement (Krishna *et al.*, 1990).

L'altitude semble influencer la productivité du sulla, qui devient plus importante sur les hauteurs (Sarno *et al.* 1978). Le sulla possède un grand potentiel de production. En 1965, Le Houerou, obtenait jusqu'à 90 t/ha de matière verte de sulla coupé au stade floraison soit l'équivalent de 13 t/ha de matière sèche.



Photo 7 Exploitation progressive du sulla du nord (Bikra 21) par fauche manuelle à Ain Ghélal (nord tunisien) en novembre 2002 (Ben Jeddi, 2002)

Le sulla spontané de Béja (nord-ouest tunisien) a pu donner jusqu'à 50 t/ha de fourrage frais, soit 8,5 t/ha de poids sec (Semadeni, 1976).

Ben Jeddi *et al.* (1998) ont montré que certains génotypes sélectionnés d'origine locale peuvent fournir des rendements supérieurs à 100 t/ha de verdure au stade floraison, dépassant largement 17 t/ha de fourrage sec.

La sensibilité du sulla Sgaravatti d'origine italienne notamment à l'oïdium (*Erysiphe trifolii* var. *intermedia* (U. Braun) (U. Braun et S. Takam)) et aux conditions de stress hydrique aléatoire, ajoutée à son faible taux de matière sèche et de protéines brutes explique en partie la régression des emblavures à sulla observée ces dernières années (M.A.E.R.H, 2002).

Semé fin octobre, le sulla Sgaravatti atteint 25 cm en février et produit alors 1 t/ha de matière sèche soit l'équivalent de 10-11 t/ha de verdure. En cette période hivernale, le taux de matière sèche se trouve encore à un niveau faible (10 %). De 15 février à 15 mars, il croît de 40 cm en triplant son rendement. En avril, la plante produit 4 t/ha de matière sèche soit l'équivalent de 25 t/ha de fourrage vert donc un taux de 16 % de matière sèche (Rondia *et al.*, 1985). Restuccia (1975) a montré qu'avec une dose de semis de 80 kg/ha de gousses (30 kg/ha de graines décortiquées), le maximum de rendement atteint par le sulla au stade floral a été de 6,2 t/ha de matière sèche soit 40 t/ha de verdure donc un taux de matière sèche de 15,5 %.

La variabilité observée au niveau de la productivité et du taux de matière sèche du sulla dépend de plusieurs facteurs dont principalement le génotype, le milieu pédoclimatique et l'entretien comme la fertilisation. A partir d'une courbe de croissance du sulla exprimée en matière sèche dans le temps, Leto *et al.* (1989) ont trouvé que sa production moyenne journalière atteint son maximum en fin février et décroît rapidement fin mars.

En Tunisie, d'une région et d'une année à l'autre, le rendement en matière sèche du sulla de première année, se situe entre 3 et 6 t/ha et entre 4 et 8 t/ha la deuxième année (Ben Emna, 1991). Cependant, Rys *et al.* (1988) montrent qu'en Nouvelle Zélande, le sulla est plus productif la première année. Dans ces conditions, la production de matière sèche atteint 18,6 t/ha la première année et seulement 6,1 t/ha la deuxième année. En Tunisie et en condition d'irrigation de complément, les rendements obtenus par Ben Emna (1991) avec des variétés d'origine italienne ont été totalement différents. Le sulla de 1^{ère} année produit 6,3 t/ha de matière sèche alors que le sulla de 2^{ème} année peut produire jusqu'à 16,4 t/ha. Rondia *et al.* (1985) ont montré qu'un sulla de 1^{ère} année laissé sans coupe jusqu'à la production de graines, démarre mieux à l'automne suivant qu'un sulla coupé en vert. Les semences égrainées ont contribué d'avantage à une meilleure levée et repousse du sulla non coupé après les pluies automnales. Ce couvert est formé simultanément de plantes issues de la germination des graines tombées au sol et de plantes repoussant à partir des souches de la première année.

2. 5. Valeur fourragère du sulla du nord

Au fur et à mesure que la plante vieillit, les tiges deviennent grosses, fistuleuses et lignifiées tandis que les teneurs en protéines brutes, en matière grasse et en substances minérales diminuent considérablement. Cependant, la teneur en cellulose brute du sulla demeure inférieure à celle de la luzerne (*Medicago sativa* L.) exploitée au même stade (Piccioni, 1965). Le fourrage du sulla est un peu plus énergétique que le bersim (*Trifolium alexandrinum* L.) (0,76 UFL/kg MS). Alors que, ce dernier contient plus de protéines brutes (23,7 %) (Tableau 1).

Tableau 1 Quelques valeurs nutritives du sulla en comparaison avec la luzerne et le bersim (INRA, 1978)

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

Espèce	UFL /kg MS	PB _% MS__	CB	PDIN _g/kg MS__	PDIE
Sulla: <i>Hedysarum coronarium</i> L.	0,76	15,5	27,9	107	105
Luzerne: <i>Medicago sativa</i> L.	0,76	19,3	30,5	134	118
Bersim: <i>Trifolium alexandrinum</i> L.	0,72	23,7	16,3	113	106

La composition chimique du sulla est voisine de celle du trèfle violet (*Trifolium pratense* L.) à l'exception de sa teneur en protéines brutes inférieure au stade floral 13,3 % contre 16,2 % (Ben Emna, 1991). A ce même stade, le sulla est aussi plus pauvre en calcium (9,2 %), magnésium (2,4 %) et phosphore (2,9 %) que la luzerne (*Medicago sativa* L.) (Maymone *et al.*, 1951).

Les teneurs en tanins condensés du sulla ont été évalué à 88 g/kg de matière sèche. Malgré cela, le sulla s'est trouvé mieux apprécié par les animaux que le lotier (*Lotus corniculatus* L.) avec moins de tanins (50 g/kg de matière sèche). La richesse du sulla en hydrates de carbone (180 g/kg de matière sèche) fait que les animaux apprécient bien cette espèce (Douglas *et al.*, 1999). La digestibilité de l'azote métabolisable atteint des valeurs plus élevées que les valeurs obtenues par la digestibilité apparente. Entre le stade bourgeonnement et épanouissement des fleurs, une baisse de la digestibilité a été observée (tableau 2). Cette réduction a été de l'ordre de 20 % pour la matière organique et 24 % pour les protéines brutes. Comparé au sulla non pâturé, le pâturage provoque des repousses de meilleure qualité (Rondia *et al.*, 1985).

Le faible taux de matière sèche (15-18 %) du sulla gêne sa conservation directe par ensilage. Ben Jeddi (1996) a montré que le préfanage du sulla avec éclatement des tiges avant la conservation permet de produire un ensilage de qualité. Ce résultat a été confirmé par Charmley et Veira (1991) avec un ensilage de luzerne (*Medicago sativa* L.).

Tableau 2 Digestibilité des protéines brutes et matière organique du sulla Sgaravatti (Rondia *et al.*, 1985)

Stade	digestibilité (%)	
	protéines brutes	matière organique
Bourgeonnement	72,5	74,0
Floraison	57,6	56,2

Quant au foin de sulla, il est considéré comme un fourrage concentré de la valeur du foin de luzerne (*Medicago sativa* L.) et meilleur que le foin de vesce-orge (*Vicia sativa* L.-*Hordeum vulgare* L.) ou vesce-avoine (*Vicia sativa* L.-*Avena sativa* L.) (Bigourdan, 1933). Cependant, le fanage du sulla est délicat en raison de la turgescence et de la chute de ses feuilles au cours du fanage et ramassage du foin. Dans ces conditions, la mise en andains non tassés doit être réalisée dès que les feuilles flétrissent donc avant dessèchement total. Le séchage doit continuer à l'intérieur de l'andain. Les animaux apprécient bien le foin de sulla surtout lorsqu'il provient d'une culture de première année ayant des tiges moins grosses que celle de deuxième année (Semadeni, 1976).

3. VULNERABILITE DE LA DIVERSITE BIOLOGIQUE DE *Hedysarum coronarium* L. ET MENACES

3. 1. Définitions de la diversité biologique

La diversité biologique communément appelée biodiversité telle qu'elle a été définie au sommet de la terre à Rio en 1992 englobe l'ensemble des êtres vivants terrestres, marins ou de zones humides ainsi que les complexes biologiques dont ils font partie. Elle peut se référer aux grandes subdivisions du monde ainsi qu'aux usages qui en sont faits. On parle ainsi de biodiversité végétale, de biodiversité animale, de biodiversité microbienne, de biodiversité agricole etc.

La diversité biologique englobe trois composantes (Zouaghi, 1998):

- la diversité systématique qui engendre la liste des espèces appartenant à tous les groupes de la classification linnéenne;
- la diversité écologique qui renferme le nombre d'écotypes et les interactions multiples qui les régissent; et
- la diversité génétique qui coïncide avec les ressources génétiques caractérisées par leurs niveaux moléculaires.

La diversité biologique résultant de la différenciation des espèces est parfois riche dans certains endroits de la terre prouvant l'existence de centres d'origine de l'espèce végétale appelés aussi réservoirs de la diversité biologique (Vavilov, 1926).

Elle peut être parfois faible et peu diversifiée particulièrement en cas de modification et déstabilisation importante des écosystèmes, aboutissant à la perte de nombreux taxons. De nombreuses actions de l'homme peuvent conduire à une dénaturation des génomes d'origine ou érosion génétique (Zouaghi, 1998; Hamrouni, 1998; Gammar, 1998).

3. 2. Contraintes liées à la diversité biologique

Actuellement, la diversité biologique végétale est confrontée à plusieurs contraintes de natures diverses représentant une menace pour sa stabilité. Parmi ces contraintes, nous citons:

- La création variétale visant l'amélioration d'un seul caractère tend à réduire la variabilité souvent recherchée dans les cultures fourragères et met au point des variétés moins adaptées à leurs milieux d'origine. De même, la disparition des variétés traditionnelles au profit des nouvelles (Timothy, 1972; Timothy et Goodman, 1979; Prescott-Allen et Prescott-Allen, 1982; Wilkes, 1985; Hawkes, 1991), représente un des facteurs ayant favorisé le développement d'une érosion génétique très accentuée. Cette situation est très préoccupante pour les allogames en raison des risques de dénaturation génétique des écotypes locaux par injection incontrôlée de génomes étrangers (Zouaghi, 1989). Les processus de l'évolution et de la sélection naturelle sont ainsi modifiés (Altieri, 1991).

- Le surpâturage menace les formes sauvages de la plupart des espèces. Même les graminées et les fabacées spontanées indispensables au pâturage extensif risquent un jour de disparaître. Toute fois, le rythme et l'ampleur de l'érosion génétique constatés au 20^{ème} siècle sont sans précédent (Donald *et al.*, 1990). La végétation naturelle risque de se perdre avec une réduction de son habitat naturel (Fluit et Roberts, 1988).

- Le changement d'affectation des terres à pâturages spontanés telles que celles des prairies naturelles du nord de la Tunisie paraît le plus spectaculaire. Ces prairies considérées depuis longtemps (Gagey, 1912), comme le réservoir fourrager naturel de la Tunisie représentant à l'origine près de 15 % de la surface des pâturages totaux du nord du pays (2 millions d'hectare), n'en représentent plus que 0,03 % (Zouaghi, 1998). Elles ont subi un défrichement intense au profit des cultures céréalières et arboricoles et plus récemment pour installer des prairies artificielles permanentes.

Des auteurs comme Ducellier (1919); Gagey (1912); et Laumont (1949) ont indiqué qu'au début du dernier siècle des prairies denses et luxuriantes, où dominaient souvent des fabacées comme le sulla, existaient dans les zones septentrionales de la Tunisie (nord de la dorsale). Ces prairies ont disparu avec leur mise en culture et la croissance de la population (Lapeyronie, 1982). Narjisse (1990) a montré que dans le bassin méditerranéen, de nombreux pâturages naturels ont été convertis à l'agriculture.

- Le développement de certaines opérations techniques telles que le désherbage utilisant des produits non sélectifs et rémanents tend à réduire toute la flore indésirable dans le champs y compris les espèces non gênantes à la culture. Il en résulte parfois une érosion génétique importante de certaines espèces (Hawkes, 1991).

Dans une culture de sulla, sur les 22 espèces recensées comme adventices associées seulement 3 espèces sont considérées redoutables qui dominent la plante. Il s'agit de *Sinapis arvensis* L.; *Ridolfia segetum* (L.) Moris; et *Carduus pycnocephalus* L., le reste des adventices demeure sans effet néfaste (figure 8).



Figure 8 Parcelle de sulla du nord (Bikra 21) à fleurs rouges envahie par le faux fenouil (*Ridolfia segetum* (L.) Moris) et le chardon (*Carduus pycnocephalus* L.) (Station expérimentale de l'INAT à Mornag, avril 2004)

Dans ce cas, Raouf (2002) a montré que l'utilisation d'un herbicide dont la matière active est composée de Bentazone et de MCPA (Basagran M) sur le sulla, n'affecte que 34 % de la flore adventice tout en inhibant et retardant d'au moins 23 jours la végétation du sulla. Malgré cela, ce produit continue à être utilisé.

En 1985, le Conseil international pour les ressources phyto-génétiques a souligné l'étendue de l'érosion génétique de diverses espèces fourragères et pastorales utilisées en Afrique du nord (Alfaiz *et al.*, 1990). Actuellement, certains centres de collecte habituellement visités par les sélectionneurs n'abritent plus des espèces jadis mentionnés sur les cartes phyto-écologiques cas de *Hedysarum coronarium* L. (Ben Jeddi, 2004).

4. COLLECTE ET PRESERVATION DU GERMOPLASME FOURRAGER

Le germoplasme groupe tout matériel biologique collecté ou non et qui sert de base à l'amélioration des plantes et à la recherche (Creech et Reitz, 1971).

Ce germoplasme dérive de trois sources:

- espèces sauvages et cultures en forme primitive;
- plants migrants en dehors de leur habitat d'origine où leur diversité peut être augmentée; et
- plantes uniques issues de croisements.

En 1974, une institution autonome appelée IPGRI (*International plant and genetic resources institut*) a été créée. En relation avec la FAO, cet organisme est chargé de développer un réseau international englobant tous les centres des ressources génétiques. En Tunisie et en collaboration avec les instituts nationaux de recherche, IPGRI a organisé deux programmes de collecte de germoplasme fourrager respectivement en 1976 et en 1984.

Depuis 1980, le Laboratoire de Productions Fourragère et Pastorale de l'INAT a créé une collection active puis s'est doté d'une petite banque de gènes groupant plus de 1000 écotypes locaux et accessions appartenant à 92 espèces fourragères et pastorales (Zouaghi et Ben Jeddi, 1988). Cependant, les moyens de conservation se sont améliorés après la création en 1998 d'une banque de gènes à l'échelle de l'Institut.

En plus des collectes internes annuelles, de nombreuses actions internationales ont été réalisées (West *et al.*, 1992).

4. 1. Techniques de collecte de germoplasme

La technique de collecte dans diverses régions naturelles est une voie importante pour l'obtention d'un matériel biologique adapté à différents environnements. Cette ressource phytogénétique peut contribuer au développement de systèmes fourragers efficaces (Fehr, 1987). La caractérisation des sites écologiques par le collecteur permet la classification des divers échantillons collectés (Tyler et Charlton, 1976). Cette stratégie dépend de l'objectif de la collecte:

- collecte du maximum de diversité à l'intérieur du même taxon; et
- voire le modèle de distribution intra et inter-populations.

Hawkes (1981) a montré que l'existence d'une diversité génétique importante au sein d'un même endroit rend la collecte encore plus intéressante. Marshall et Brown (1975) ont montré l'intérêt de collecter entre 50 et 100 plantes par population et par site de collecte bien limité. Ce chiffre peut être réduit à 50 si les informations sur la composition des populations sont déjà connues.

Dans ce cadre, Breese (1989) a trouvé qu'il est plus utile de réduire le nombre de plantes par site que le nombre de sites à collection. Dans certains cas comme les pâturages où les plantes ne peuvent pas produire des semences, la transplantation dans des parcelles de multiplication contrôlées devient nécessaire (Tyler et Charlton, 1976). Cette technique est adoptée même dans les régions arides avec des espèces pastorales pérennes (Neffati, 1994).

La collection de germoplasme est une technique délicate, l'objectif est l'obtention d'un haut niveau de diversité génétique avec un nombre et une taille de l'échantillon gérables (Hawkes, 1981).

4. 2. Qualité et conservation de semences fourragères

Pour jouer son rôle, la semence doit se trouver dans les trois conditions suivantes:

- une bonne viabilité;
- un milieu favorable (humidité, température et lumière); et
- une absence de dormance.

Le maximum de germination dans un lot de semences est obtenu suite à une récolte au stade maturité complète. La germination est déterminée par les facteurs pourcentage et vitesse (Heydeker, 1972). Pour ne pas interférer dans les phénomènes de dormance de post-récolte, une période doit s'écouler entre la collecte et le semis des semences en plein champ.

4. 2. 1. Aperçu sur la qualité des semences

Plusieurs facteurs définissent la qualité d'une semence:

- La faculté germinative, le poids de 1000 semences, la viabilité et la pureté spécifique ou variétale sont des facteurs qualitatifs caractérisant un lot de semences (tableau 3).

Tableau 3 Normes de qualité établies pour certaines semences fourragères certifiées (Législation tunisienne, 1980)
*: Umberto Quattrocchi, (2000)

Espèces	pureté spécifique (% du poids)	faculté germinative minimum (% germes normaux)
<i>Hedysarum coronarium</i> L.	95	70
<i>Vicia faba</i> L. var. <i>minuta</i> * (Hort. ex Alef.) Mansf.	97	65
<i>Trifolium alexandrinum</i> L.	98	60
<i>Avena sativa</i> L.	95	80
<i>Hordeum vulgare</i> L.	95	80
<i>Festuca arundinacea</i> Schreb.	98	80

Les paramètres indiqués au tableau 3 diffèrent selon le type de semences produites (semences de base, certifiées ou standards) (Législation tunisienne, 1980). Quoique la présence de graines dures dans un lot de semences de légumineuses déprécie leur qualité, on accepte parfois des taux relativement élevés comme pour les luzernes annuelles (*Medicago truncatula* Gaertn.). Ces dernières sont utilisées dans un système de culture particulier appelé (*ley-farmimg*) adapté aux zones semi-arides. Dans ce cas, les graines dures permettent de former un stock de semences dans le sol qui ne germent qu'à suite à une grande pluie favorisant leurs germination et multiplication ultérieure. Ainsi l'espèce sera sauvegardée des effets néfastes des sécheresses. Nelson *et al.* (1968) ont montré qu'un niveau de 20 à 30 % peut être accepté. Cependant, aucune corrélation n'est signalée entre la dureté et la viabilité des graines (Fairey et Lefkovitch, 1991).

- La caractérisation génétique, dans ce cas les variétés sont caractérisées par les chercheurs, les maisons semencières et les agences de certification en utilisant des traits morphologiques observés au niveau des semences, jeunes plantes et plantes adultes (Jianhua *et al.*, 1996). MacDonald (1988) a montré que ces caractères peuvent être masqués par certains stress physiologiques comme la sécheresse.

- L'aspect phytosanitaire d'un lot de semence est fondamental. Certains pathogènes ne peuvent néanmoins être détectés par les méthodes conventionnelles d'où le recours aux méthodes biotechnologiques de diagnostic telles que l'électrophorèse ou la RAPD (*random amplified polymorphism DNA*) (Hampton *et al.*, 1996). Lavato (1992) a montré que le contrôle des maladies et des techniques de production dans un champs de multiplication sont très importants pour produire des semences de qualité.

Toutes les observations réalisées doivent être consignées sur des fiches de notation validées par le laboratoire de contrôle de semences (De Goyou, 1996). La présence d'adventices dans une culture porte-graines détériorent la qualité de la semence produite. Leur présence constitue un grave problème pour les multiplicateurs de semences (Rao et Moody, 1990).

Selon les espèces fourragères produites, la Législation tunisienne a fixé des normes déterminant la qualité des semences. Dans un lot de semences, les adventices ne sont tolérées que si leur taux de présence est au plus égale aux valeurs présentées au tableau 4.

Tableau 4 Taux maximum d'adventices tolérées dans les lots de semences fourragères (Législation tunisienne, 1980)

Espèces semences	taux d'adventices en % du poids des semences
<i>Hedysarum coronarium</i> L.	0,2
<i>Vicia faba</i> L. var. <i>minuta</i> (Hort. ex Alef.) Mansf.	0,1
<i>Trifolium alexandrinum</i> L.	0,1
<i>Avena sativa</i> L.	0,5
<i>Hordeum vulgare</i> L.	0,5
<i>Festuca arundinacea</i> Schreb.	0,5

Les lots de semences ne peuvent être certifiés que si les échantillons prélevés sur chacun des lots sont conformes aux normes officielles de certification pour la germination et la pureté spécifique.

Les analyses nécessaires sont réalisées selon les règles internationales mises au point par ISTA (*International Seed Testing Association*). Cette certification garantit une équivalence de jugement quelque soit le pays d'origine (De Goyou, 1996).

4.2.2. Conservation des semences

La collection de germoplasme aboutit à deux voies:

- conservation, documentation et utilisation immédiate; et
- conservation nationale et internationale à long terme.

En effet, le but de la conservation est de préserver la diversité des végétaux cultivées et sauvages (Holly, 1991). Cette préservation est assurée soit par la conservation *in situ* des formes sauvages dans leurs écosystèmes en créant des réserves naturelles et des formes cultivées dans les zones d'agriculture traditionnelle; soit par la conservation *ex situ* des deux types dans des centres de recherche spécialisés (Charrier *et al.*, 1984 et Holly, 1991).

Les méthodes de conservation sont nombreuses et varient selon les moyens disponibles (Painting *et al.*, 1993):

- stockage longue durée de type congélation à température inférieure à zéro (cas de la majorité des espèces);
- multiplication végétative classique sous forme de tubercules, bulbes, rhizomes, comme le cas du napier ou herbe à éléphant (*Pennisetum purpureum* Schum.). Cette espèce n'arrive pas à produire des semences en Tunisie vu que ses besoins en lumière et température ne sont pas satisfaits; et
- multiplication *in vitro* de plantes ayant une valeur particulière.

Dale (1991) a montré que la collecte et la conservation de la diversité du germoplasme ne doivent pas constituer une fin pour le travail sur les ressources génétiques. Ceci doit être complété par une évaluation (Hawkes, 1981) ou une classification sur certaines caractéristiques agronomiques.

Après une période de conservation, la semence peut ne pas germer pour une raison ou une autre. Cette incapacité de germination porte ainsi préjudice à sa qualité (Roos, 1989). De ce fait, la connaissance du pouvoir germinatif initial de la semence avant d'entamer la conservation détermine déjà la durée nécessaire du stockage (Hampton *et al.*, 1996). Les conditions de faible humidité de la semence (4-5 %) et de basse température (-18°C) sont très favorables à une bonne conservation des semences (Zhang *et al.*, 1995).

En effet, la conservation consiste à réduire la respiration et empêcher la prolifération de la microflore. L'utilisation de conditions anaérobiques pendant la conservation est souvent bénéfique. Cette technique bloque la respiration et toute altération au niveau du germe.

La variation de la température du lieu de conservation ainsi que l'humidité des semences représentent des facteurs influant la réussite du stockage des semences. Lors de la conservation, certains mécanismes peuvent intervenir tels que:

- la détérioration de la membrane embryonnaire et des lipides peroxydases de l'albumen;
- l'accumulation des composés toxiques comme l'acide cyanhydrique issu de l'hydrolyse d'un hétéroside comme l'amygdaline (Evenari, 1949);
- la perte des coenzymes ou des hormones et la dégradation des acides nucléiques et des protéines (Priestly, 1986); et
- la libération par les semences de substances volatiles tels que le méthanol, l'éthanol, l'acétyl-aldéhyde et l'acétone dont certains sont très toxiques comme l'acétyl-aldéhyde (Zhang *et al.*, 1993).

Les semences destinées à la conservation sont sujettes à un contrôle judicieux depuis le plein champs. Elles sont obtenues à partir de semences parentales appartenant à des variétés bien déterminées et multipliées dans des conditions qui préservent leur identité (De Louche, 1979). Une fois récoltés, les lots subissent un contrôle des taux d'humidité et des impuretés. Des traitements préventifs (fongicides et insecticides) sont souvent nécessaires afin d'éviter la détérioration du lot de semences (De Jong, 1961).

Ellis *et al.*, (1989) ont montré l'intérêt de la conservation génétique longue durée mise au point en 1974 par IPGRI. En effet, les humidités réduites à 6 ou 7 % dans les semences minimisent leur infestation par les champignons. La déshydratation des semences jusqu'à 5 % avec une conservation à -18°C favorise une meilleure longévité. Dans ces conditions, les graines gardent un bon pouvoir germinatif (Behaeghe et Blouard, 1969).

5. SELECTION ET CRITERES DE SELECTION DES ESPECES FOURRAGERES

La sélection des plantes est une technique pratiquée depuis l'aube de l'agriculture il y a déjà 10000 ans. Les plantes sont choisies pour leur adaptabilité à des environnements divers, pour leurs goût, couleur, arôme (odeur) texture et qualité culinaire. Le travail d'amélioration des ressources génétiques n'a pas progressé de la même manière pour toutes les espèces. La sélection du germoplasme en vue de son introduction dans un programme d'évaluation est toujours basée sur les caractéristiques aussi bien morphologiques que génétiques des plantes (Burt *et al.*, 1979).

Dans un programme d'amélioration des espèces fourragères, une bonne connaissance de la distribution géographique, environnementale et de la diversité agro-morphologique des génotypes est très utile pour mettre au point une collection valable. Pengelly et Eagles (1995) ont montré que la morphologie des plantes n'est pas toujours corrélée avec la distribution géographique des accessions. Clément et Ludlow (1977) ont trouvé une corrélation négative entre la latitude géographique et la hauteur du noeud nodulaire, ce qui pourrait être relié à la tolérance au froid. L'allogamie couramment rencontrée dans une majorité d'espèces fourragères contribue au maintien d'une très grande diversité génétique; qui leurs confère une considérable capacité d'adaptation tant aux facteurs environnementaux (Hudson *et al.*, 1990), qu'aux phénomènes de spéciation (phénomènes qui seraient à l'origine ou bien de la séparation des espèces) (Poisson, 1992).

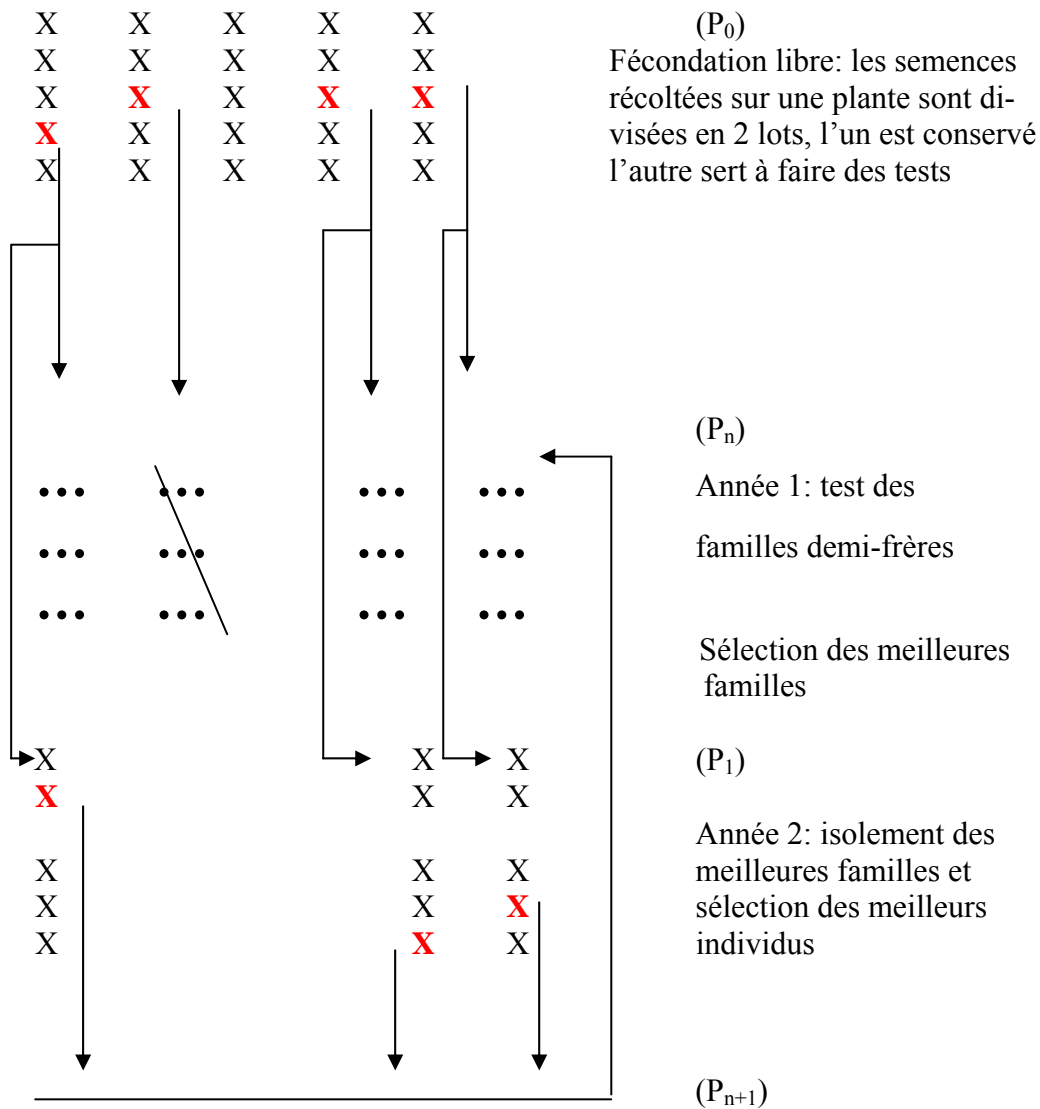


Figure 9 Schéma de sélection récurrente phénotypique individuelle et familiale demi-frère (Gallais, 1990)

Pour procéder à des sélections efficaces, Ehrlich et Ehrlich (1983) ont insisté sur l'existence d'une base génétique suffisamment large. Les méthodes de sélection des espèces fourragères pérennes ont peu évolué et plus de 95 % des variétés inscrites dans les catalogues officiels sont synthétiques ou des variétés-populations à base large. Les espèces fourragères allogames sont améliorées par sélection récurrente (Figure 9). Les méthodes couramment utilisées sont la sélection phénotypique combinée individu-famille et la sélection sur descendances. Pour les espèces pérennes, la vigueur et la repousse, l'homogénéité de la production et la qualité des semences forment des critères de sélection de base (Behaeghe et Blouard, 1969).

Monotti et Parceddu (1976) ont montré l'importance des caractères physiologiques (résistance au froid et aux maladies) et morphologiques (hauteur des plantes) dans un programme de sélection du sulla. La prise en compte de la régularité et la répartition de la production, l'adaptation à la pâture, la qualité et le redémarrage après une coupe jouent un rôle primordial dans la sélection de fourrages vivaces (Prosperi et Genier, 1996).

En agriculture, où le climat est très peu prévisible, Rottili (1979) a prouvé l'intérêt des variétés souples ayant une base génétique assez large. La sélection est par conséquent orientée vers la création d'ensembles génotypiques ayant des caractéristiques qui répondent d'une manière positive aux variations du milieu. L'interaction génotype-environnement représente alors le fond du concept de stabilité du caractère (Sneller *et al.*, 1997). Cette interaction est d'un grand intérêt dans la sélection (Baker, 1988). La stabilité de rendement d'un génotype entre divers environnements est déterminée sur la base d'un coefficient de régression décrivant la variation du rendement d'un génotype donné dans un environnement quelconque par rapport à la performance moyenne de tous les génotypes testés dans le même environnement. Le degré de variabilité de ce coefficient d'un site à l'autre permet de dire si le génotype testé a un comportement stable ou non et de classer ainsi les génotypes entre eux (Jaluluddin et Harrisson, 1993). La mesure avec précision dans le même environnement des caractéristiques génotypiques, aboutit à une sélection indemne d'erreurs et permet de différencier le matériel biologique selon ses capacités génétiques (Walter, 1987).

En production fourragère, on recherche les variétés comportant un grand nombre de lignées ayant en commun des qualités agronomiques et commerciales similaires. Ces variétés présentent l'avantage d'éviter les fluctuations de rendements. Les sélectionneurs doivent ainsi proposer plusieurs variétés compétitives non seulement en terme de rendement et caractères agronomiques mais aussi en terme de prix de revient (Donald *et al.* 1990). Les variétés synthétiques ou bien les variétés dites population reviennent toujours moins chères que les hybrides ou d'autres comme les transgéniques.

Vu l'allogamie importante, l'étude du polymorphisme enzymatique du sulla dénote une variabilité intra-spécifique importante (Trifi-Farah *et al.*, 1989; Louati *et al.*, 2000). Cette variabilité a porté sur le nombre de folioles par feuille, la longueur de l'axe principal, le nombre de rameaux latéraux et la longueur totale de tous les axes. Selon le milieu, Rios *et al.* (1992) ont classé le sulla comme une espèce pastorale de haute qualité et palatabilité. Par contre, d'autres auteurs la considèrent comme une plante à potentiel limité (Trifi-Farah *et al.*, 1989). Les conditions pédoclimatiques dans lesquels le sulla a été testé seraient à l'origine de cette contradiction.

L'amélioration des espèces fourragères doit tenir compte surtout de leur valeur alimentaire. Une sélection réalisée sur la souplesse du feuillage de la fétuque (*Festuca arundinacea* Schreb.) a permis d'améliorer la qualité du fourrage et particulièrement sa digestibilité. La digestibilité du fourrage reste un facteur prioritaire, mais son ingestibilité est aussi importante.

Une variabilité pour ce critère a été trouvée sur des génotypes de ray-grass pérenne (*Lolium perenne* L.) au pâturage ou de luzerne (*Medicago sativa* L.) en vert (Emile *et al.*, 1997), de ray-grass annuel (*Lolium multiflorum* Lam.) en vert (Ben Jeddi *et al.*, 1992) et de sulla (*Hedysarum coronarium* L.) en vert (Ben Jeddi *et al.*, 1998) ou en ensilage (Ben Jeddi, 1996).

6. EVALUATION DU GERMOPLASME FOURRAGER

Le développement de nouveaux cultivars performants d'espèces fourragères passe obligatoirement par le processus de l'évaluation du matériel biologique collecté.

Martiniello (1992) a montré l'importance des caractères morphologiques et agronomiques pour l'identification d'écotypes de diverses espèces fourragères. Pour *Hedysarum coronarium* L., les caractères les plus significatifs utilisés lors de l'évaluation ont été la hauteur des plantes, la couleur des fleurs, la latitude de la zone d'origine, la douceur de la partie aérienne (feuilles et tiges glabres ou velues), la forme des folioles, la longueur de la tige principal, la surface des folioles, la forme et la couleur des semences (Martiniello, 1992). Sarno *et al.* (1978) ont trouvé que l'évaluation des caractéristiques bio-agronomiques comme la ramification, la taille et l'architecture des plantes, a permis de sélectionner les meilleurs génotypes dans 81 populations différentes de sulla. Dans ce cas, le nombre de feuilles par plante a été le caractère le plus important.

Lourd *et al.* (1984) ont montré que l'évaluation des ressources phytogénétiques doit se faire en deux phases. La première est basée sur une analyse génotypique et la seconde est du type agronomique.

La diversité génotypique est estimée à partir de deux types de données:

- les données phénotypiques qui seront d'autant plus représentatives que les valeurs phénotypiques seront de bons estimateurs des valeurs génétiques (Louati *et al.*, 2000); et
- les données moléculaires: pour cela certaines techniques analysent la variabilité telle que les isozymes, le polymorphisme de la longueur des fragments de restriction de l'ADN et les données issues de l'électrophorèse bidimensionnelle des protéines dénaturées (Leford-Buson *et al.*, 1988 ; Trifi *et al.*, 1989 ; Chriki, 1990).

L'évaluation de la production fourragère et des semences est primordiale pour la sélection et la mise au point de nouvelles variétés. Les agriculteurs traditionnels furent les premiers sélectionneurs cherchant des rendements stables plus qu'une productivité élevée (Donald *et al.*, 1990).

L'hétérogénéité observée dans un ensemble génétique offre une opportunité pour le sélectionneur qui contribue à l'élaboration de nouvelles variétés (Hawkes, 1981). L'estimation des stades phénologiques de l'ensemble des génotypes s'avère intéressante pour caractériser globalement la précocité du couvert végétal d'une année ou d'un site d'évaluation à l'autre (White, 1979). Dans un programme d'amélioration, Robertson (1968) a montré l'intérêt d'utiliser une échelle biométéorologique tenant compte à la fois de la température et de la photopériode. Cette méthode permet de mettre en évidence le caractère précocité du germoplasme. Pour les espèces fourragères et plus particulièrement les fabacées, le couvert végétal est considéré comme une structure qui se renouvelle d'une coupe à l'autre. A partir de cela, apparaissent dans le programme d'évaluation deux types d'analyse:

- une analyse synchronique au moment de chaque coupe; et
- une analyse diachronique à travers l'ensemble des coupes.

L'amélioration du germoplasme doit aussi s'interroger sur le type d'agriculture dans laquelle les nouvelles variétés devraient être employées (Rottili, 1979).

6. 1. Evaluation du matériel séminal

6. 1. 1. Les graines dures

Déjà en 1916, Harrington avait signalé que le terme graine dure doit être exclusivement réservé aux fabacées. La présence de ces graines dans la majorité des fabacées fourragères spontanées et même cultivées détériore la qualité des levées suite à une réduction de la germination. Les téguments durs qui couvrent la graine arrêtent toute hydratation rapide et même les attaques par les prédateurs (Vasques-Yanes et Orozco-Sagovia, 1993). Cette imperméabilité a été attribuée à une membrane imperméable en raison de sa structure cellulaire en palissade contenant des quinones. Alors que, les membranes externes sont pectinées et imbibées d'une matrice de subérine (Ballard, 1973). La principale barrière à l'absorption de l'eau est formée par des ostéosclérides (Bewley et Black, 1985).

Pour le sulla du nord, la Législation tunisienne a fixé un niveau maximum de 30 % de graines dures dans un lot de semences. Plusieurs travaux traitent ce problème afin d'améliorer le niveau de germination. Des techniques ont été employées comme la scarification des semences commerciales (Fu *et al.*, 1996), le ramollissement artificiel des téguments (Hare et Rolston, 1985) ou bien la sélection de plantes ayant un moindre taux de graines dures dans des populations spontanées de diverses origines (Ben Jeddi *et al.*, 1998).

En zone méditerranéenne, la réserve du sol en eau est un facteur très important de l'environnement. Ce facteur est encore plus marquant lorsque les plantes atteignent le stade floraison (Ney *et al.*, 1994). L'irrégularité des pluies ou bien l'interruption des pluies après un début d'automne relativement humide peut être néfaste pour la production des fabacées surtout annuelles.

Dans ces circonstances, les géotypes à graines dures paraissent comme une voie permettant la réduction des pertes de semis après une pluie insuffisante (Taylor, 1996). Ainsi, la sélection de fabacées à graines dures peut valoriser certains parcours de la région méditerranéenne, où l'on enregistre souvent des pertes de semis après un automne précoce suivi d'une période de manque de pluies.

Comme toute autre espèce de fabacée annuelle à resemis naturel, le sulla du nord est touché par la présence d'un taux variable de graines dures. Cette variabilité dépend aussi bien de l'environnement (Semadeni, 1976) que du matériel génétique (Taylor et Ewing, 1988). Cependant, ce taux peut atteindre un niveau très élevé supérieur à 90 %. Les conditions sèches de l'environnement en cours de maturité des semences et même durant la conservation ainsi que les températures élevées en période de floraison accroît d'avantage le taux de graines dures dans un lot de semences de sulla. Pour cela, Sulas et Carreda (1996) ont trouvé que la dureté des graines du sulla suit une dynamique à régression négative. Durant la période post-récolte des semences de sulla (Grimaldi et Sparacia), les graines dures passent de 95 % (à la récolte) à 74 % après un intervalle de temps de moins de 3 mois. Sulas et Carreda (1996) ont montré qu'en deuxième année de culture, la persistance du sulla est assurée soit par rejet issus des souches anciennes soit par la naissance de nouvelles plantules à partir des graines dures conservées dans le sol.

6. 1. 2. Effet des stress abiotiques

L'évaluation de la germination des semences dans divers milieux faisant varier la température (Bishnoi et Delouche, 1980) ou bien l'humidité (Lovato et Cagalli, 1992) permet de tester leur adaptation à ces variations.

Peu d'essais de performance de la germination utilisent les stress thermiques et salins (Dell'Aquila et Di Turi, 1996). Récemment, plusieurs tests de vigueur germinative sous des conditions de stress ont été proposés par les chercheurs pour l'évaluation des lots de semences. Ces techniques aboutissent à un plus d'information ayant une importance primordiale dans la sélection des géotypes.

La salinité représente une des contraintes majeures pour la réussite de l'installation et de la croissance des plantes (Szabolcs, 1994). La principale origine du sel est l'irrigation par des eaux titrant entre 1 et 4 g/l. Cette situation est assez courante dans les régions semi-arides ou même dans l'humide proche de la côte. Cependant, l'irrigation excessive et le mauvais drainage accentuent d'avantage les méfaits du sel sur l'installation des cultures (Rehman *et al.*, 1997). Dans ce contexte, 500 000 ha de terres irriguées deviennent annuellement désertiques (Grainger, 1986) à cause des eaux d'irrigation assez chargées en sel.

La germination et la vigueur des plantules sont largement influencées par la température qui représente un facteur environnemental très utilisé. En parallèle, la corrélation entre l'humidité du sol et la germination de certaines espèces n'est pas tout à fait bien développée (Jeffrey Mullahey *et al.*, 1996). Pour cela, la simulation de l'humidité du sol par le polyéthylène glycol (PEG) est une technique utilisée pour comprendre certains processus de la germination liés à la variation des conditions hydriques du sol.

Au sein d'une même espèce ou variété, le degré de tolérance à des conditions de stress hydrique ou autre varie d'un stade biologique à l'autre (Rehman *et al.*, 1997). Catalan *et al.* (1994) ont rapporté que le degré de sensibilité des plantes à la sécheresse a été plus élevé au stade germination. La salinité affecte aussi la germination par la création d'un potentiel osmotique bloquant l'absorption de l'eau ou par l'effet toxique des ions sodium et chlorure (Poljakoff-Mayber *et al.*, 1994).

6. 2. Evaluation de l'interaction génotypes-environnements

En Tunisie, la fluctuation des rendements des cultures pluviales est due en grande partie aux conditions climatiques. La pluviométrie avec ses variabilités spatiale et temporelle constitue l'un des problèmes les plus aigus dans la détermination du niveau de production des différentes spéculations agricoles. Comme le phénotype est le produit du génotype et de son environnement (Falconner, 1974), il s'avère approprié de qualifier ce génotype par son expression moyenne à travers une série d'environnements. Une interaction génotypes-environnements survient lorsque des génotypes réagissent différemment à divers environnements.

Dans ce cas, l'amélioration de la stabilité du rendement est l'un des objectifs essentiels qui préoccupe l'améliorateur des plantes. Fernandez (1991) définissait la stabilité comme étant la solidité de la performance génotypique évaluée dans différents sites et/ou années. Des essais de plein champ ont montré que l'interaction génotypes-environnements est presque toujours significative. Ce résultat rend la classification des génotypes parfois délicate du fait que le meilleur génotype n'est pas toujours meilleur dans tous les environnements (Biarnes-Dumoulin *et al.*, 1996). Certaines variables liées à l'environnement (températures et pluies) et aux génotypes (poids de semences et période de l'initiation florale) ont été signalées pour classer des génotypes comme le sorgho (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) (Saeed et Francis, 1984). La sélection devient simplifiée au cas où l'interaction génotypes-milieux n'est pas significative. Dans ce cas, le meilleur génotype dans un seul site naturel est aussi le meilleur à travers tous les autres (Basford et Cooper, 1998).

Les espèces fourragères à croissance biennale ou pérenne et qui sont exploitées plusieurs fois lors de leur croissance rendent encore une fois l'interprétation des résultats plus difficile. Dans le cas de l'évaluation du rendement en matière sèche, l'interaction génotypes-environnements a été significative pour plusieurs espèces comme la fétuque (*Festuca arundinacea* Schreb.) (Nguyen *et al.*, 1980) et l'alpiste (*Phalaris arundinacea* L.) (Casler et Hovin, 1984).

Une interaction génotypes-années a été aussi observée pour la qualité fourragère de l'avoine (*Avena sativa* L.) (Stuthman et Marten, 1972). Dans beaucoup de cas, la variation de la magnitude du site de semis a un effet sur le comportement des génotypes. Ainsi, la sélection qualitative des espèces pérennes doit tenir compte de tous les stades biologiques, les coupes et les sites expérimentaux pour pouvoir évaluer correctement les divers génotypes (Endres, 1990).

Casler (1990) a trouvé une interaction génotypes-coupes significative pour la valeur alimentaire des graminées fourragères comme l'alpiste (*Phalaris arundinacea* L.). La qualité de plusieurs coupes de la même année peut être exprimée en une valeur globale en utilisant une moyenne pondérée (Cherney et Volenec, 1992). Cooper et Hammer (1996) ont montré l'intérêt des essais multiloceaux dans la sélection des génotypes et leurs impacts sur l'amélioration de la production dans les systèmes de culture.

7. PARTICULARITES ET CONDUITE DES CULTURES FOURRAGERES SEMENCIERES

7.1. Généralités

Une culture destinée à la production de semences exige une densité de semis plus faible que celle d'une fourragère. Un couvert végétal peu dense dit ouvert permet une meilleure incidence de la lumière solaire entre les plantes donc moins de perte de feuillage par étiolement (Simon, 1985). Ainsi, la surface foliaire photosynthétisante sera meilleure. Le contrôle des adventices devient alors une priorité afin que la culture ne soit pas envahie (Mouelhi, 2004). La production de semences est largement corrélée avec la date de semis (Kondra *et al.*, 1983). Toute fois, les semis tardifs exposent la culture à l'effet négatif des températures élevées sur le développement post-floral succédant la mise en fleurs pour les espèces ayant un besoin relatif en froid.

Srivstava (1986) a montré que quelque soit l'espèce, la date de semis pour une production de semences coïncide avec la date de semis d'un bon fourrage. Le respect d'un système de rotation permettant d'éviter l'épuisement de la fertilité des sols ainsi que le développement de maladies nuisibles a une influence sur la qualité des semences et la pureté variétale de l'espèce à multiplier. Fuchs (1987) a présenté l'intérêt d'éliminer les espèces indésirables surtout en période de floraison. Selon la Législation tunisienne (1973), la densité des adventices ne doit pas dépasser 1 plante sur 25 m² pour les semences de base. Le respect d'un assolement judicieux permet de préserver l'état sanitaire de la parcelle (Jussiaux, 1983).

Certaines maladies telles que les virales causent des dégâts énormes sur les fabacées. Dans ces cas, la production de fourrage et de semences peut chuter jusqu'à 32 % (Jones et Nicholas, 1992). A titre d'exemple, le virus de la mosaïque peut réduire le rendement du trèfle souterrain (*Trifolium subterraneum* L.) de 71 %, alors que le sulla est résistant à ce virus (McKirdy *et al.*, 2000).

En Tunisie, le mauvais entretien (fertilisation, désherbage...) des parcelles de médic (*Medicago truncatula* Gaertn.) entraîne des rendements en semences très faibles (100-120 kg/ha) (Chartterton et Chartterton, 1991).

7. 2. Cas des fabacées fourragères

En plus des fertilisants majeurs (P_2O_5 et K_2O), les fabacées ont besoin d'autres éléments secondaires comme le bore pour la production de semences. El Mili (1983) a montré qu'un apport de 0,7 kg/ha d'acide borique sur une luzernière améliore les rendements en graines. Le taux d'amélioration a varié de 27 à 97 %, lorsque la densité de semis a passé de 8 à 24 kg/ha.

L'inoculation des semences avant le semis de fabacées par des bactéries spécifiques à l'espèce, comme par exemple le *Bradyrhizobium japonicum* (Kirchner 1896) Jordan 1982, comb. nov., pour le soja, contribue à améliorer la nodulation et peut assurer une bonne nutrition azotée à la plante (Vincent, 1974). Ben Jeddi *et al.* (1989) ont trouvé que la présence dans la rhizosphère de souches efficaces de (*Rhizobium leguminosarum* (Frank 1879) Frank 1889) contribue à améliorer le nombre de nodules par poids racinaire de la féverole (*Vicia faba* L. var. *minuta* (Hort. ex Alef.) Mansf.). Dans ce cas, une meilleure fixation de l'azote atmosphérique a été obtenue, donc plus de protéines synthétisées par la plante et par conséquent une amélioration de la production semencière. L'inoculation du sulla par son *Rhizobium* spécifique (*Rhizobium sullae* Squartini *et al.*, 2002, sp. nov.) formellement appelé *Rhizobium hedysari* (Squartini *et al.*, 2002) a entraîné une augmentation du nombre de nodules par plante et du taux des protéines respectivement de 60 et 40 % par rapport au sulla non inoculé (Tibaoui, 1986). Ceci montre l'intérêt de l'inoculation des semences avant le semis dans les sols où le *Rhizobium* se trouve défaillant.

L'arrêt des irrigations en fin de printemps (avril) est considéré comme un moyen pour inciter l'espèce à fleurir en une période où les températures sont favorables (Fobair, 1981). Selon Martiniello et Ciola (1995), le rendement en semences est corrélé positivement avec l'irrigation et les pluies. Au cours du cycle de développement du bersim (*Trifolium alexandrinum* L.), 4 irrigations de 80 mm au total ont été réalisées au moment où l'évapotranspiration atteint 80 mm/mois. Cette technique fait augmenter le rendement semencier du bersim de 19,5 %. Cependant, des précautions sont à prendre à fin d'éviter toute toxicité due aux sels dissous dans les eaux d'irrigation. De même, N'cib (1991) a montré qu'un stress hydrique modéré (-75 mm par rapport au témoin) au stade induction florale du bersim appliqué au début du printemps (mars) a entraîné une augmentation de la production de semences malgré une diminution de 30 % de l'indice foliaire. Dans ce cas, le nombre d'inflorescences par unité de surface est amélioré de 78 %.

La production de semences a atteint 900 kg/ha en plus du fourrage produit par 4 coupes. Dans ces conditions, l'utilisation des eaux usées traitées par lagunage peut jouer un rôle important dans le domaine de la production de semences.

Le succès de la double exploitation (fourrage/semences) de certaines espèces fourragères est fortement influencé par la date de semis, le nombre de coupes et le stade de développement de la culture (Royo *et al.*, 1994).

Chez le bersim le nombre de coupes conseillé est de 4 (N'cib, 1991) alors qu'il est réduit à 1 coupe pour un sulla de première année et 2 coupes pour un sulla de deuxième année (Ben Jeddi, 2002).

7. 3. Exemple du sulla du nord

Bigourdan (1933) a trouvé un rendement de 200 à 500 kg/ha de graines pour un sulla de première année. Le sulla Sgaravatti peut produire jusqu'à 600 kg/ha de graines (Villax, 1963). Cependant, avec des génotypes de sulla local, Khériji (1999) a obtenu des rendements allant jusqu'à 860 kg/ha de graines contre 610 kg/ha avec la variété Sgaravatti installée dans les mêmes conditions.

La production de semences du sulla est faible en absence d'insectes pollinisateurs. Satta *et al.* (2001) ont montré que *Apis mellifera* L. et *Eucera numida* Lep. forment les principaux insectes pollinisateurs du sulla. Ces derniers améliorent le nombre de gousses par inflorescence et le nombre de graines par gousse respectivement de 98 et 42 %. Pinzanti et Magnani (1981) ont recommandé l'introduction de 5 à 8 colonies d'abeilles par hectare. La présence d'abeilles sur le couvert végétal est jugée suffisante lorsqu'on constate 3 à 4 butineuses par mètre carré (El Mili, 1983). Cependant, l'effet des abeilles peut être affecté par les basses températures et les vents violents (Dulmet, 1980). Un couvert de sulla dépourvu d'insectes pollinisateurs produit seulement 32 % de semences par rapport à un autre conduit en libre fécondation. Le nombre de gousses par inflorescence et celui des graines par gousse diminuent avec l'éloignement des colonies d'abeilles de la surface fourragère (Pinzanti et Magnani, 1981). Chez les légumineuses vivaces, Martiniello (1992) a montré que l'âge de la plante influence la production de semences. Ainsi, afin d'avoir une bonne production, il est préférable de réserver la première année de sulla pour les semences.

8. LES SYSTEMES DE PRODUCTION AGRICOLE ET DURABILITE

En Tunisie, 59 % des terres cultivées se trouvent sous le régime céréale/céréale et jachère/céréale. Les légumineuses fourragères et alimentaires interviennent seulement sur 16 % de la surface emblavée annuellement (Saunders, 1979). Cette répartition demeure aléatoire d'une année à l'autre mais sans changer significativement.

Neily (2000) a montré que les fabacées ont occupé seulement 7,5 et 20 % des emblavures de trois gouvernorats du nord-ouest tunisien respectivement en 1999 et 2000. Cette situation ne fait que réduire la réserve organique du sol soumise à une minéralisation encore accentuée dans les conditions méditerranéennes par des régimes pluviaux très aléatoires (Resck *et al.*, 1991).

8. 1. Définitions

Sebillote (1990) a défini le système de culture comme une surface traitée d'une manière homogène par des cultures selon un ordre de succession et un itinéraire technique bien défini.

Il caractérise les systèmes par un ensemble de composantes à savoir, le calendrier de travail, le contrôle des adventices, la fertilisation, le déroulement des techniques appliquées ainsi que la quantité et la qualité des productions.

Dans une agriculture intégrant aussi bien le végétal que l'animal, le système de culture doit fonctionner en harmonie avec les systèmes fourrager et d'élevage.

8. 1 .1. Les systèmes fourragers

Attonaty (1980) a défini le système fourrager comme un ensemble de moyens de production, de techniques et de processus servant à assurer sur une exploitation la correspondance entre le ou les systèmes de culture et le ou les systèmes d'élevage. Il a pour objectif principal, l'autosuffisance des ressources alimentaires et l'équilibre entre les besoins du troupeau et les fourrages produits sur l'exploitation. Dans ce cadre, Zouaghi (1991) a montré que l'efficacité d'un système ne peut être mesurée correctement que par une analyse énergétique. L'évaluation du niveau atteint par la productivité quantitative et qualitative permet de juger la réussite du système.

En Tunisie, deux types de systèmes fourragers existent, le système intensif en irrigué et le système en régime pluvial. L'intensification de la production fourragère se heurte à divers obstacles principalement naturels tels que l'irrégularité des pluies et la nature des sols. Lapeyronie (1974) a mis au point divers niveaux d'intensification selon la pluviométrie de la région. Hentgen 1982 a précisé que la disponibilité variétale, la gestion des herbages, la maîtrise de la fertilisation, le mode d'assolement, la valorisation des déjections animales et le type de production influencent directement le choix des espèces fourragères à installer dans un environnement particulier.

8. 1. 2. Les systèmes de culture

Le système de culture représente un sous-ensemble du système de production. Il est défini par les cultures avec leur ordre de succession et les itinéraires techniques (Gras, 1990). Les aspects essentiels du système de culture sont les cultures et la succession des cultures. Ce système se divise en système de grandes cultures (céréales, fourrages et protéagineux) et système légumier (cultures maraîchères). Ces systèmes entraînent des effets directs et indirects sur le milieu cultivé.

8. 1. 3. Les systèmes d'élevage

Le système d'élevage englobe toute les techniques qui interviennent dans l'élaboration de la production animale (Gibon, 1981).

La vocation fourragère de l'exploitation oriente le système d'élevage approprié. En zone méditerranéenne, la sensibilité du système aux variations climatiques varie selon la stratégie suivie par l'agriculteur dans la gestion et la conduite de l'ensemble des systèmes de production.

La disponibilité d'une réserve fourragère importante par animal est un facteur indiquant le niveau de sécurité face aux aléas climatiques (Gibon *et al.*, 1983). Cependant, des variations entre années restent importantes et sont même plus fortes que les écarts saisonniers observés au cours de la même année. Dans ces conditions, les agriculteurs peuvent corriger la situation par des techniques de conservation comme l'ensilage qui permet de substituer une verdure manquante. Duru *et al.* (1999) ont montré que la conduite du système d'élevage n'est pas nécessairement influencée par une variation des ressources fourragères.

8. 2. Durabilité des systèmes de culture

A partir de la deuxième moitié du 20^{ème} siècle, une grande partie des terres cultivées a subi une détérioration sévère. L'intensification de l'irrigation souvent mal gérée et l'utilisation de fertilisants chimiques ainsi que des herbicides ou autres sur la majorité des cultures ont fait surgir des problèmes nouveaux tels que la salinisation des terres ou l'apparition de formes de ravageurs résistants.

La fragmentation des systèmes de culture basés sur la monoculture a rompu les cycles écologiques, miné le sol et les systèmes hydrauliques et usé la diversité biologique (Shiva, 1994).

8. 2. 1. Définition d'une agriculture durable

L'agriculture durable s'inscrit dans le cadre du développement durable. Ce dernier a été défini par Brundtland (1987) comme étant un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre à leurs besoins. Se sont inscrits dans cette perspective:

- l'agriculture biologique qui bannit l'usage des substances chimiques tout en préservant le capital naturel; et
- les systèmes de culture dits intégrés qui assurent l'efficacité des productions tout en réduisant les intrants par une meilleure valorisation du milieu (Beranger et Cossee, 1998).

8. 2. 2. Energétique et durabilité des systèmes de culture

En l'an 2025, 83 % de la population mondiale vivront dans les pays en développement.

L'agriculture doit augmenter sa production sur des terres déjà ou parfois surexploitées, tout en évitant les terres marginales comme les bas fonds ou bien les montagnes. L'objectif essentiel d'un développement agricole durable est d'assurer un accroissement soutenu de la production et d'améliorer la sécurité alimentaire (ONU, 1992).

En agriculture, l'énergie nécessaire ne représente pas seulement l'énergie fossile sous forme de carburant mais aussi tous les intrants intervenant dans la production agricole dont les fertilisants. En Tunisie, l'énergie consommée par un blé continu sous forme d'engrais représente plus de la moitié du total. Une rotation permet de réduire au moins de 20 % la consommation énergétique, après valorisation des résidus azotés laissés par le précédent cultural du blé (Zouaghi, 1988).

Le bilan énergétique présente un intérêt pour la réflexion actuelle sur la durabilité de l'agriculture et son impact sur l'environnement. Depuis longtemps, les améliorations de la productivité ont rendu l'agriculture très dépendante des énergies non renouvelables. Ces énergies interviennent:

- en amont par les engrais et les produits phytosanitaires;
- directement sur l'exploitation pour le fonctionnement du matériel agricole; et
- en aval pour la transformation, la distribution et la conservation des produits.

Zouaghi (1988) a montré qu'en culture pluviale, un blé après une jachère consomme en amont $379,5 \times 10^7$ Joules/ha sous forme de fertilisants chimiques et produits phytosanitaires. Dans le même contexte, le fonctionnement du matériel agricole nécessite $228,0 \times 10^7$ Joules/ha. La consommation énergétique qui vient en aval est évaluée à $198,3 \times 10^7$ Joules/ha. Cette analyse énergétique a été développée dès le début des années '70 mais elle n'a connu un essor réel que lors de la crise pétrolière en 1973. Elle se trouve indépendante des conjonctures du temps et de l'espace et n'intègre que les dépenses et les productions réelles contrairement aux analyses économiques qui intègrent aussi des plus-values abstraites et souvent fictives (Zouaghi, 1988). Elle est en fait utilisée comme outil de diagnostic de fonctionnement des exploitations agricoles.

Pimentel et Murd (1973) ont trouvé que l'accroissement de la productivité agricole est fait grâce à des quantités croissantes d'énergie non renouvelable.

Selon la nature de la culture, l'efficacité énergétique varie largement. Une céréale comme l'orge (*Hordeum vulgare* L.) présente un coefficient de transformation de l'énergie (énergie produite/énergie consommée) variant de 3,5 à 4,0. Dans les mêmes conditions naturelles, le trèfle de Perse (*Trifolium resupinatum* L.) atteint un coefficient de 8,0. En association orge-vesce (*Hordeum vulgare* L.-*Vicia sativa* L.), ce coefficient s'améliore de 53 % par rapport à une culture pure d'orge (Ben Jeddi, 1986).

L'obtention d'un bon rendement de culture ne reflète pas toujours un bon rendement énergétique. De ce fait, une analyse énergétique peut apporter des éléments complémentaires aux analyses classiques.

8. 2. 3. **Assolements et rotations des cultures**

Depuis l'antiquité et le moyen âge, la jachère est pratiquée. Dans les zones favorables à l'agriculture, cette sole fût abandonnée suite à la croissance démographique. Après, des cultures améliorantes ont été introduites dans les systèmes de culture et les rotations deviennent de plus en plus complexes jusqu'au 19^{ème} siècle comme (luzerne: *Medicago sativa* L./blé dur: *Triticum durum* Desf. ou blé tendre: *Triticum aestivum* L.)/ maïs: *Zea mays* L. /colza: *Brassica napus* L.). La révolution verte du 20^{ème} siècle a orienté les agriculteurs vers la simplification des rotations et la pratique de la monoculture. Dans ce contexte, et en France, un essai de monoculture de blé a été installé depuis 1900. Dans cet essai, les adventices et les maladies cryptogamiques constituent entre autres les facteurs les plus limitants.

Dans une rotation, Sebillote (1990) a montré qu'il existe deux effets successifs sur la sole cultivée:

- un effet précédent qui représente la variation du milieu biophysique entre le début et la fin de culture précédente; et
- un effet suivant résultant de la réponse de la culture aux variations du milieu.

Les effets du précédent cultural peuvent se manifester durant plusieurs cultures. Varvel et Peterson (1990) ont montré que le retour à la pratique des rotations observé dans certains pays est la conséquence d'une augmentation progressive des coûts des fertilisants non organiques, en particulier l'azote; d'une réduction des rendements dans les système de monoculture et des problèmes de pollution due aux nitrates.

Marty *et al.* (1984) décrivaient la rotation comme une succession de cultures dans le temps et dans la parcelle, alors que l'assolement représente la composante spatiale de l'occupation des terres par les différentes cultures à un instant donné.

Cet assolement a pour objectif d'optimiser l'exploitation des ressources naturelles végétales dans l'agriculture avec toutes les contraintes possibles dues aux climat, sol, cultures, itinéraires techniques et facteurs sociaux. L'obtention de rendements élevés met en jeu la manipulation de matériels biologiques ayant un potentiel productif important et capable de valoriser au mieux les ressources disponibles du milieu.

Dans ce contexte, la mise en rotation des cultures doit obéir à certains critères:

- le précédent cultural doit libéré le sol au bon échéance afin d'installer la culture suivante;
- la dernière récolte doit laisser un sol bien structuré pour une préparation fine et correcte; et
- la sole doit être maintenue propre dans le but de réduire l'utilisation des herbicides surtout en culture (dicotylédone) où il est plus difficile de maîtriser les adventices.

L'amélioration relative des rendements par le système de rotation des cultures est un fait décrit par plus d'un auteur (Pierce et Rice, 1988). En milieu aride, le modèle jachère/céréale conserve peu les ressources hydriques disponibles seulement 79 mm après un sorgho (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) (Unger, 1994). Cette situation varie en fonction de la pluviométrie de l'année. En Tunisie, Yankovitch (1946) a discuté la place de la jachère dans les systèmes de culture, et a montré qu'une jachère ne peut conserver convenablement son humidité que si le total des pluies après début août atteint 200 mm. Dans ce cas, si l'automne et l'hiver sont pluvieux, la croissance du blé suivant (*Triticum durum* Desf.) sera limitée, suite à une perte très importante de l'azote par la jachère. Si au contraire l'automne et l'hiver sont secs, les pluies printanières favorisent alors une meilleure croissance du blé. Loomis et Connor (1992) ont montré que les principaux avantages obtenus à partir des rotations sont la facilité de contrôler les adventices et les maladies plus que l'apport d'azote ou l'amélioration de la réserve en eau de la parcelle.

9. IMPACT DES ROTATIONS SUR LES SYSTEMES DE CULTURE

9.1. Le milieu édaphique

9.1.1. Les propriétés chimiques

9.1.1.1. La matière organique

La matière organique du sol englobe tous les débris végétaux, des produits chimiques tels que les acides organiques et un ensemble de substances stables formant l'humus y compris les micro-organismes. Cette matière organique est fractionnée en deux parties:

- les matières organiques fraîches ou libres; et
- les matières organiques liées ou stables.

Ainsi, la teneur en carbone organique du sol est positivement corrélée avec le niveau des résidus des cultures laissés à la surface du sol (Christensen *et al.*, 1994). Dans les régions céréalières, la tendance à la simplification des systèmes de culture et l'absence d'un assolement adéquat ont pour effet l'appauvrissement progressif, lent mais sensible, des sols en matière organique. L'insuffisance et la cherté du fumier obligent les producteurs de céréales à utiliser massivement les engrais chimiques (Heenan *et al.*, 1994). En culture continue de céréales, Henin et Dupuis (1945) ont montré que la décomposition de la matière organique du sol est plus rapide que sa formation suite aux passages successifs des charrues pour travailler le sol. Cette technique accélère l'oxydation des résidus des cultures et l'apparition d'éléments de minéralisation lessivables comme l'azote (Stewart et Bettany, 1982; Tracy, 1986). De plus, dans cet horizon de sol, l'activité microbienne est plus intense ce qui accélère la décomposition de la matière organique (Follet et Schimel, 1989).

Dans les systèmes de rotation Blevins *et al.* 1977 ont trouvé que l'introduction de cultures ayant des exigences autres que les céréales et laissant plus de résidus comme les cultures fourragères améliore la réserve de matière organique du sol. Kpombrekou et Tabatabai (1997) ont aussi signalé l'intérêt des fabacées dans les rotations parce qu'elles restituent au sol une bonne quantité de matière organique. Vilain 1989 a trouvé que ces restitutions humiques annuelles ont varié selon l'espèce de 300 à 700 kg/ha. Sauerbeck et Johnen 1977 ont montré que la quantité de matière organique mesurée par échantillonnage lors de la récolte ne reflète pas la situation réelle. Dans ce cas, la masse organique accumulée au niveau des racines puis en partie décomposée au cours du cycle biologique de la culture se trouve nettement plus importante que celle mesurée. Il est souvent plus facile d'estimer avec précision la production des parties aériennes que racinaires. Après 4 années de culture, une luzernière laisse dans le sol l'équivalent de 1,4 t/ha de matière organique. Cette matière organique provient de l'accumulation de résidus sous forme de résidus secs (racines et fanes) estimés à 18 t/ha. Ces apports organiques sont influencés par la conduite du système de culture. La rotation, le travail du sol, la fertilisation, l'irrigation ainsi que les traitements phytosanitaires affectent l'état physico-chimique du sol et par conséquent la minéralisation de la matière organique (Delphin, 1989). En rotation céréalière interrompue pendant 4 années par une luzerne (*Medicago sativa* L.), Delphin et Conesa (1979) ont trouvé une augmentation de 20 % de la teneur en matière organique du sol par rapport aux parcelles de céréale en continue sans luzerne. Dans une rotation, le précédent cultural doit présenter les caractéristiques suivantes:

- avoir un système racinaire pouvant exploiter une couche de terre importante;
- valoriser les apports d'engrais;
- fournir des restitutions organiques (racines et fanes) importantes; et
- avoir un cycle de développement assez court pour ne pas gêner la culture suivante.

Le colza (*Brassica napus* L.), les fabacées et les prairies temporaires sont considérés comme de bonnes têtes de rotation possibles. L'effet des rotations sur la teneur organique des terres se justifie plus dans les systèmes de production sans élevage. Dans ce cas, les résidus culturaux constituent les seuls apports organiques disponibles. Ainsi, les rotations incluant les fourrages peuvent améliorer la fertilité des sols, réduire les infestations d'adventices, diminuer l'érosion, augmenter les rendements et limiter leur variabilité inter-annuelle (Viaux *et al.*, 1999). Cette situation est attribuée à la matière organique restituée soit directement par les résidus des cultures soit indirectement par le fumier. L'importance de cette restitution varie selon la nature des cultures. La détermination d'un bilan humique (Rémy et Marin-Lafliche, 1974) permet de prévoir en partie les répercussions du précédent cultural sur le taux de matière organique (Vilain, 1989). Comparées aux prairies semi-permanentes ou permanentes, les cultures dérobées comme le maïs (*Zea mays* L.) destiné à l'ensilage contribuent à réduire les restitutions organiques au sol par les résidus de récolte (Boiffin et Fleury, 1974).

9. 1. 1. 2. Les restitutions azotées des cultures

Plusieurs chercheurs ont montré que les fabacées peuvent fournir une partie ou l'ensemble de l'azote nécessaire à la production de la culture suivante comme la céréale (Hargrove, 1986; Ebelhar *et al.*, 1984). L'effet principal des fabacées dans les rotations est leur contribution à améliorer l'azote dans le sol (Hargrove, 1986; Badaruddine et Meyer, 1989). Cet élément représente l'essentiel des matières organiques avec le carbone. Il se trouve dans les résidus végétaux, les produits résiduels ou transitoires de leur décomposition, les substances humifiées ainsi que dans la biomasse microbienne. Les origines de l'azote peuvent être principalement la minéralisation de la matière organique restituée au sol, la fixation symbiotique de l'azote (N₂) et la fertilisation chimique (Sanaa, 1993). La quantité d'azote fixée par les fabacées varient selon l'espèce et les facteurs du milieu (Wani *et al.*, 1995). Elle peut atteindre 95 % du total exporté par la culture comme le soja (*Glycine max* (L.) Merr.) (Peoples *et al.*, 1995)

La quantité de l'azote issue des résidus dépend en partie de la nature de l'espèce. Waggoner (1989) a montré que le taux d'azote libéré à partir des fabacées est significativement plus important que celui des graminées, respectivement 75 à 80 % contre 50 %. Cet effet justifie le rôle que peut jouer une fabacée dans un système de rotation.

Groya et Sheaffer (1985) ont montré que le mélilot (*Mélilotus officinalis* L.) laisse dans le sol l'équivalent de 68 kg/ha d'azote pour les cultures suivantes comme le blé (*Triticum aestivum* L.). Olson *et al.* (1986) ont trouvé que la fertilisation azotée d'un maïs (*Zea mays* L.) cultivé après une fabacée peut être réduite ou même annulée. Après le labour, Bruulsema et Christie (1987) ont montré que 71 % de l'azote fixé par une luzerne est libéré au sol.

Heichel et Barnes (1984) ont signalé qu'une céréale comme le maïs (*Zea mays* L.) semé après un soja (*Glycine max* (L.) Merr.) a besoin de moins d'azote sous forme d'engrais chimique (ammonitrate) qu'une monoculture. Cependant, l'exportation de l'azote par le soja est plus importante que l'azote fixé symbiotiquement. Cette espèce prélève aussi bien l'azote biologique que l'azote minéral se trouvant dans le sol. Il en résulte que le bilan azoté du soja est déficitaire de plus de 80 kg d'azote/ha. L'utilisation de l'azote du sol par une fabacée se fait indépendamment de la fixation symbiotique. Elle permet de réduire la perte de l'azote minéral par lessivage (Varvel et Peterson, 1992). Dans une rotation, le soja (*Glycine max* (L.) Merr.) laisse dans le sol jusqu'à 497 kg/ha d'azote dans un horizon de 90 cm du sol, facilement exporté par le maïs suivant (*Zea mays* L.) (Stute et Posner, 1993).

La corrélation positive qui existe entre la production fourragère des fabacées et l'azote produit (Hoyt, 1987) permet de prévoir les superficies à semer en céréales ainsi que leur besoin en azote en rapport avec ce qui est laissé dans le sol. Le niveau de l'azote restitué par une culture est largement influencé par le taux d'humidité du sol.

En saison sèche, les nitrates se fixent sur les particules argileuses et la matière organique du sol (George *et al.*, 1993). Le passage à une saison humide fait perdre des nitrates solubles par lessivage (George *et al.*, 1994), et selon le cycle de développement de la culture, il peut y avoir une exploitation ou non de cet azote.

Les apports d'azote par les racines demeurent toujours limités (George *et al.*, 1992). Quelque soit le cas, Mc Ewen *et al.* (1989) ont trouvé que la quantité d'azote minéral restitué au sol est beaucoup plus importante après une fabacée qu'après n'importe quelle autre espèce. Hesterman (1988) définissait une valeur dite de substitution de l'azote fertilisant et qui représente la dose d'azote apportée à une monoculture de céréale pour produire le même niveau de rendement qu'une céréale cultivée après une fabacée et sans fertilisation azotée. Cette valeur permet de quantifier l'effet de la fabacée en matière azotée sur la culture suivante (Vanotti et Bundy, 1995).

Une fertilisation azotée dans un sol bien pourvu (150 kg/ha) n'a aucun effet sur un blé suivant une fabacée. L'analyse par l'azote marqué montre que la céréale a tendance à assimiler plus l'azote endogène du sol issu de la minéralisation des résidus laissés par la fabacée que l'azote apporté par fertilisation (Clarholm, 1989). En parallèle, le carbone radiculaire améliore le niveau de l'azote assimilable par stimulation de l'activité microbienne du sol (Fryson et Oaks, 1990).

9. 1. 2. Les propriétés physiques du sol

Reeves et Wood (1994) ont étudié l'effet bénéfique des rotations sur le sol. Une meilleure structure après une fabacée favorise un meilleur prélèvement des minéraux et surtout l'azote par la culture suivante. Dans un sol argileux, Angers et Mehuys (1988) ont trouvé qu'une rotation de type orge/luzerne (*Hordeum vulgare* L./*Medicago sativa* L.) améliore la stabilité des agrégats humides du sol par rapport à une jachère ou une céréale. Kristian Aase *et al.* (1996) ont montré que la substitution de la jachère par les fabacées annuelles est la solution qui permet de mieux valoriser le potentiel sol. Parfois la conversion de ces fabacées en engrais vert apporte d'avantage de bénéfice au sol et à la culture suivante.

Le pourcentage des particules du sol ayant un diamètre inférieur à 5 mm a été plus élevé dans une rotation trèfle/céréale (*Trifolium pratense* L./*Triticum aestivum* L.) par rapport à une céréale continue (Raimbault et Vyn, 1991). Fahad *et al.* (1982) ont montré que l'introduction d'une fabacée dans un système de production céréalière améliore les propriétés physiques du sol. Dans ce contexte, les fabacées annuelles intervenant dans des rotations de courte durée contribuent à réduire les différents travaux du sol en rendant le sol plus friable en surface ainsi que la lutte mécanique des adventices (Izaurrealde *et al.*, 1993). En conséquence, une économie de consommation de l'énergie est signalée.

La minimisation du travail du sol après une fabacée préserve le sol contre l'érosion ainsi que les ressources hydriques. Bolton *et al.* (1985) ont montré que l'utilisation des fourrages dans les rotations améliore les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques du sol. Comparées aux systèmes de monoculture hautement consommateurs d'azote minéral, les rotations incluant les fabacées réduisent le niveau d'azote perdu par lessivage contribuant à la pollution du sol et des nappes phréatiques (Varvel et Peterson, 1990).

9. 2. Le système céréalier

9. 2. 1. Facteurs intervenant dans l'accroissement des rendements céréaliers

L'amélioration du potentiel productif des céréales après une fabacée est la résultante de deux composantes, à savoir l'effet rotation (Miller et Dexter, 1982) et l'effet azote restitué au sol (Groya et Sheaffer, 1985).

La monoculture de blé a été démontrée défailante par plusieurs chercheurs qui confirment l'importance d'introduire une culture annuelle comme le trèfle (*Trifolium pratense* L.), la vesce (*Vicia sativa* L.) ou le mélilot (*Melilotus officinalis* L.) dans un système de rotation. Cependant, les effets de ces espèces sur la culture suivante sont variables. Le recours à un apport d'appoint de fertilisant azoté est parfois nécessaire en vue de compléter le manque d'azote. Cet effet de rotation est justifié soit par une meilleure disponibilité de l'azote après la fabacée soit par une immobilisation de l'azote en présence des résidus du précédent cultural (Sanford et Hairston, 1984).

Robinson *et al.* (1984) ont trouvé que l'accroissement du rendement et de la teneur en protéines des grains de blé après une légumineuse est plus important dans les sols lourds à texture fine que les sols légers. Higgs *et al.* (1990) ont indiqué l'effet d'autres facteurs comme la structure du sol. Ainsi, l'effet fabacée sur une céréale est plus significatif dans un sol peu fertile. D'autres facteurs sont signalés comme la pluviosité de l'année qui influence l'effet du précédent cultural dans la rotation. Les conditions d'humidité tendent à augmenter cet effet (Benson, 1985).

9. 2. 2. Amélioration de la production des céréales en rotation avec les fabacées fourragères

Cassman *et al.* (1992) ont montré que l'augmentation des rendements en grains du blé (*Triticum aestivum* L.) n'est pas toujours suivie d'une amélioration de leur teneur en protéines. Dans ce cas, une stratégie de fertilisation azotée doit être mise au point afin d'optimiser aussi bien le rendement que la richesse en protéines des grains. Dans le semi-aride, cette question se complique surtout en régime pluvial où les sécheresses temporaires ne facilitent pas l'assimilation de l'azote par les plantes (Sanaa, 1993).

Dans les régions arides, Unger (1994) a trouvé que le système céréale/jachère utilise l'eau inefficacement. Le stockage de l'eau par une jachère est traditionnellement connue comme un facteur d'amélioration de la productivité du blé (Norwood, 1994). Cependant, dans des conditions de pluviosité variant de 250 à 300 mm, la jachère utilisée comme précédent cultural n'améliore pas le rendement en grains du blé comme une féverole (*Vicia faba* L. var. *minuta* (Hort. ex Alef.) Mansf.) qui laisse plus de résidus organiques et azotés dans le sol qu'une jachère (Lopez-Bellido *et al.*, 1996).

Dans les conditions tunisiennes, l'enfouissement de fabacées au printemps comme engrais vert permet de mieux conserver l'humidité du sol que la jachère. Cette matière organique fraîche a le pouvoir d'absorber et d'emmagasiner plus d'eau que les particules du sol Townley-Smith *et al.* (1993). Ainsi, le retournement des fabacées vertes avant la formation des graines est bénéfique pour les céréales en rotation. Les taux d'amélioration des rendements en grains de blé sont variables d'un auteur à l'autre selon la fabacée en rotation. Stoa et Zubriski (1969) ont trouvé qu'un blé semé après une luzerne (*Medicago sativa* L.) de 3 ans et sans fertilisation azotée produit 50 % de plus en grains qu'un blé après une graminée. Meyer (1987) a montré que le rendement d'un blé après un mélilot (*Melilotus officinalis* L.) est supérieur de 96 % à celui d'un autre blé conduit en continu. Miller et Dexter (1982) ont trouvé que le taux d'amélioration des grains de blé après une fabacée peut varier de 30 à 68 % de plus qu'une monoculture.

Aux Etats Unis d'Amérique, Oyer et Touchton (1990) ont montré que le maïs (*Zea mays* L.) conduit en monoculture fournit le maximum de son rendement avec 134 kg d'azote/ha; cette dose est réduite à seulement 67 kg/ha dans un système de rotation incluant le trèfle (*Trifolium incarnatum* L.) comme précédent cultural. Dick *et al.* (1986) ont rapporté que le maïs voit son rendement augmenter de 16 % par rapport à une monoculture lorsqu'il est cultivé dans un sol ayant un taux de matière organique de 2,4 %, alors que cette amélioration ne dépasse pas 6 % dans un sol riche à 5,7 % de matière organique. Dans les sols bien pourvus en matière organique, un apport supplémentaire d'azote peut être considéré comme une consommation de luxe pour la plante. Dans ce cas, l'effet de la fabacée sur la culture suivante sera anéanti par rapport à un sol non fertile.

Tableau 5 Récapitulation des effets de certaines fabacées (ns) sur le rendement en grains de céréales
 ns: non spécifiée; maïs¹: *Zea mays* L.; blé²: *Triticum aestivum* L.; sorgho³: *Sorghum bicolor* (L.) Moench; raygras⁴: *Lolium perenne* L.; L: avec labour; SD: semis direct

Auteurs	précédent	culture	gain/témoin	témoin	conditions
Dick <i>et al.</i> (1986)	fabacée (ns)	maïs ¹	+6-16 %	blé ² /maïs ¹	L
Meyer (1987)	<i>Melilotus officinalis</i> L.	blé ²	+96 %	blé ² /blé ²	L
Miller et Dexter (1982)	fabacée (ns)	blé ²	+30 %	blé ² / blé ²	SD
Miller et Dexter (1982)	fabacée (ns)	blé ²	+68 %	sorgho ³ /blé ²	SD
Stoa et Zubriski (1969)	<i>Medicago sativa</i> L.	blé ²	+50 %	raygras ⁴ /blé ²	L

Il ressort du tableau 5 que l'amélioration du rendement en grains du blé est variable entre autres selon la nature du précédent et la rotation témoin. L'effet des conditions de semis entre autres avec labour ou semis direct dans la rotation n'est pas bien encore démontré. L'augmentation de la production en grains du blé peut varier de 30 à 96 % par rapport au blé en continu.

9. 2. 3. Effet sur la teneur protéique des grains de céréales

L'effet de la rotation sur l'amélioration des teneurs en protéines des grains de céréales varient d'un environnement à l'autre (Badaruddin et Meyer, 1994). Cependant, il a été démontré que le taux des protéines dans les grains est affecté par le niveau de l'azote assimilable dans le sol ainsi que la quantité d'azote exportée par la céréale. Meyer (1987) a trouvé que la concentration des protéines dans les grains de blé (*Triticum aestivum* L.) et d'orge (*Hordeum vulgare* L.) cultivés après une fabacée est améliorée de 23 % par rapport à une monoculture. Selon le nombre d'années de fabacée précédant la céréale, le blé (*Triticum aestivum* L.) améliore différemment les taux protéiques de ses grains. En Tunisie, les taux de protéines dans les grains de blé dur (*Triticum durum* Desf.) en monoculture ont varié de 10 à 12 % (Neily, 2000), ces taux pourraient être améliorés au cas où le précédent cultural serait une fabacée. Ainsi, le taux d'amélioration peut varier de 1, 3 à 7 % respectivement pour des précédents de culture lentille (*Lens esculenta* Moench) et pois (*Pisum sativum* L.) suivi de lentille (*Lens esculenta* Moench) suivi de pois chiche (*Cicer arietinum* L.) (Miller *et al.*, 1998).

La masse organique restituée au sol par le précédent cultural influence largement la teneur en protéines des grains de céréales. Dans ce sens, le niveau d'azote issu de la minéralisation de cette matière se trouve corrélé positivement aussi bien avec la quantité que la qualité azotée de cette dernière (Meyer, 1990).

9. 3. Effet phytosanitaire des rotations

Kranse *et al.* (1988) ont montré que les performances d'une orge (*Hordeum vulgare* L.) semée après une orge sont nettement réduites suite aux infestations augmentées des maladies cryptogamiques. Un précédent cultural de type fabacée fourragère entraîne une réduction de l'incidence des maladies ou aussi des ravageurs (Henderson, 1989) ainsi qu'un meilleur contrôle des adventices et de l'érosion (Rowland *et al.*, 1986). Cependant, Loomis et Connor, 1992 ont montré que l'avantage d'une jachère n'est pas d'améliorer la réserve de l'eau et de l'azote dans le sol, mais de mieux contrôler les adventices et les maladies.

Comme les agents pathogènes responsables de certaines maladies survivent en absence de plantes, principalement sur des débris de cultures, la succession culturale semble être bénéfique dans les systèmes de culture (Schulz *et al.*, 1990). Dans une rotation, l'antéprécédent n'a pas d'effet sur la culture que si le précédent n'est pas un hôte. Alors, si le précédent est une culture hôte, le risque de maladie est augmenté (Colbach *et al.*, 1994). L'intensification des systèmes céréaliers tend à accroître les risques de maladies tant au niveau aérien que tellurique. L'application des mêmes rotations et assolements est l'une des causes majeures de cet effet.

Ambolet (1986) a trouvé que les problèmes liés aux systèmes de monoculture influent sur l'environnement immédiat de la culture qui est le suivant:

- la flore adventice: les graminées sont favorisées par le système de blé continu;
- les ravageurs: les insectes, les nématodes, les acariens... ; et
- les maladies: les champignons.

Ces problèmes peuvent être anéantis entre autres par l'utilisation de fabacées fourragères dans les rotations afin de rompre le cycle des monocultures (Kpombekou et Tabatabai, 1997). En effet, l'accroissement des rendements du blé dans des rotations fourragères comme celles utilisant le colza n'est pas seulement une conséquence d'un supplément d'apport azoté ou un meilleur contrôle des maladies. Angus *et al.* (1991) ont expliqué cet effet par une amélioration de la croissance racinaire du blé due à une suppression d'agents pathogènes du sol par des substances volatiles à partir des glucosinolates issus des résidus du colza (*Brassica napus* L.). En conséquence, Medvedev (1981) a trouvé que l'avoine (*Avena sativa* L.), le blé (*Triticum aestivum* L.) et le maïs (*Zea mays* L.) ont enregistré des rendements plus élevés lorsqu'ils succèdent une culture de colza fourrager.

Les colzas semblent réduire le potentiel infectieux du sol de certains agents pathogènes comme le piétin échaudage (*Gaeumannomyces graminis* var. *tritici* (Sacc.)) (CETIOM, 2003). Purvis (1990) a montré que la croissance des plantules de blé est influencée par une gamme de résidus restitués au sol par certaines espèces comme les brassicacées.

10. APERÇU SUR LES ESPECES UTILISEES DANS LES ROTATIONS AVEC *Hedysarum coronarium* L.

10. 1. Cas du blé dur (*Triticum durum* Desf.)

En Tunisie, le blé représente une source alimentaire stratégique. Il occupe 30 à 40 % de la surface agricole utile concentrée principalement dans la Tunisie septentrionale. Le système céréalier devient de plus en plus intensif et parfois installé en milieux naturels inadéquats (bas-fonds, montagnes..).

La conséquence de ce système se résume en:

- une dégradation des sols avec une perte progressive de la matière organique; et
- une augmentation des maladies faisant parfois perdre la totalité de la production (Eyal et Levy, 1987).

Le blé peut s'adapter à toute sorte de terre. L'azote représente le principal facteur d'augmentation de ses rendements en grains. Déjà, Coïc (1956) proposa une méthode d'apport d'azote qui assure la satisfaction des besoins du blé durant sa période de production. La détermination des besoins minéraux de la culture est fonction des apports du sol, de l'exportation par la culture et le rendement souhaité. Les variétés améliorées de blé à base génétique étroite et à haut rendement se trouvent de plus en plus sensibles aux changements pédoclimatiques et aux maladies (Feldman et Sears, 1981). Leur productivité est intimement liée aux apports croissants d'engrais azoté. Walton (1971) a montré que 90 à 99 % de la variation du rendement en grains du blé dur est expliquée par les composantes du rendement (nombre d'épis, nombre de grains par épis et le poids moyen des grains). Ces composantes se trouvent en corrélation significative avec l'environnement (pluviométrie, température, nature du sol..). L'amélioration des conditions de l'environnement immédiat (rhizosphère) de la culture du blé devient alors une nécessité en vue de rehausser et surtout stabiliser les rendements en grains.

10. 2. Cas de la féverole (*Vicia faba* L. var. *minuta* (Hort. ex Alef.) Mansf.)

La féverole s'intègre dans des assolements comme engrais vert, fourrage ou protéagineuse. Dhubert (2004) a montré l'intérêt de la féverole dans les rotations où elle arrive à maintenir le parasitisme du sol à un niveau faible. Pour cela, cette espèce devrait occuper annuellement 10 à 20 % de la surface agricole utile en sole. La féverole convient à une large gamme de terres fertiles. En Tunisie, les restitutions azotées de cette espèce peuvent atteindre 50 kg/ha et par an. Elle peut jouer le rôle d'une bonne tête d'assolement où elle nettoie le sol des adventices, du fait qu'elle est conduite comme une culture sarclée (Baccouche, 1998).

Afin d'éviter tout problème phytosanitaire dont principalement le *Botrytis* et l'*Orobanche crenata* Forsk. ou adventices dicotylédones comme la moutarde des champs (*Sinapis arvensis* L.) et la mauve (*Malva sylvestris* L.), la féverole ne doit pas revenir sur la même sole avant 4 années (ITCF, 1987). Chaillet (2001) a remarqué que les éleveurs de ruminants ont commencé à s'intéresser à la culture de féverole comme une source de protéines qui peuvent atteindre 32 % dans les graines.

10. 3. Cas du colza (*Brassica napus* L.)

D'autres espèces sont intéressantes comme le colza fourrager ou oléagineux qui exige une très bonne préparation du sol pour assurer un enracinement correcte. Adapté à un large spectre de types de sols et de climats, le colza tolère le sel jusqu'à 11 mS/cm (François, 1994) mais supporte mal l'excès d'eau (Shaffer *et al.*, 1990).

Rollier (1968) a montré que le colza est une excellente tête d'assolement pour les céréales et ne nécessite aucun investissement supplémentaire pour sa culture. Le colza semble être bien adapté à un semis direct (sans labour). Néanmoins, cette culture exporte beaucoup d'azote et de potasse, respectivement 192 et 262 kg/ha.

Le colza peut être utilisé comme engrais vert au stade début floraison pour améliorer la structure du sol. Vu sa grande capacité à mobiliser l'azote du sol, le colza a été considéré comme une culture dite (piège à nitrates) (GNIS, 1989).

L'introduction d'espèces améliorantes comme les fabacées fourragères dans un système de culture permet d'accroître aussi bien les ressources fourragères que la production animale avec un coût réduit. Baccouche (1998) a montré que l'apport de concentré à base de tourteau de soja accuse une baisse significative suite à une modification des assolements et rotations culturales faisant appel à des cultures fourragères comme le sulla (*Hedysarum coronarium* L.) et le colza (*Brassica napus* L.).

En Tunisie, l'intérêt du sulla et d'autres espèces comme la féverole signalées depuis le début du 20^{ème} siècle n'a pas fait l'objet d'une recherche longue durée. Les observations réalisées depuis longtemps ont montré un effet bénéfique des fabacées sur la céréale suivante. Dans ce contexte, la présente recherche s'intéresse à la valorisation des ressources fourragères en particulier locales comme le sulla du nord; la féverole; et le colza dans des systèmes de rotation vus sous plusieurs angles agronomique, pédologique et environnemental.

MATERIELS ET METHODES

1. PRESERVATION DU GERMOPLASME AUTOCHTONE DE *Hedysarum coronarium* L.

1. 1. Constitution d'une collection

1. 1. 1. Prospection

La prospection du gémoplasmе sulla a commencé par le dépouillement des cartes phyto-écologiques établies par Bigot *et al.*, (1967); Gounot *et al.*, (1966); Floret *et al.*, (1967a); Floret *et al.*, (1967b); et Jacquinet et Soler, (1967) et bioclimatiques (Bortolli *et al.*, 1967) de la Tunisie septentrionale. En tout, 78 sites peuvent abriter des sullas sauvages. Mais, les sites où le sulla spontané (Si) a été réellement trouvé sont indiqués sur la carte bioclimatique (figure 10), les autres sont devenus des terres agricoles.

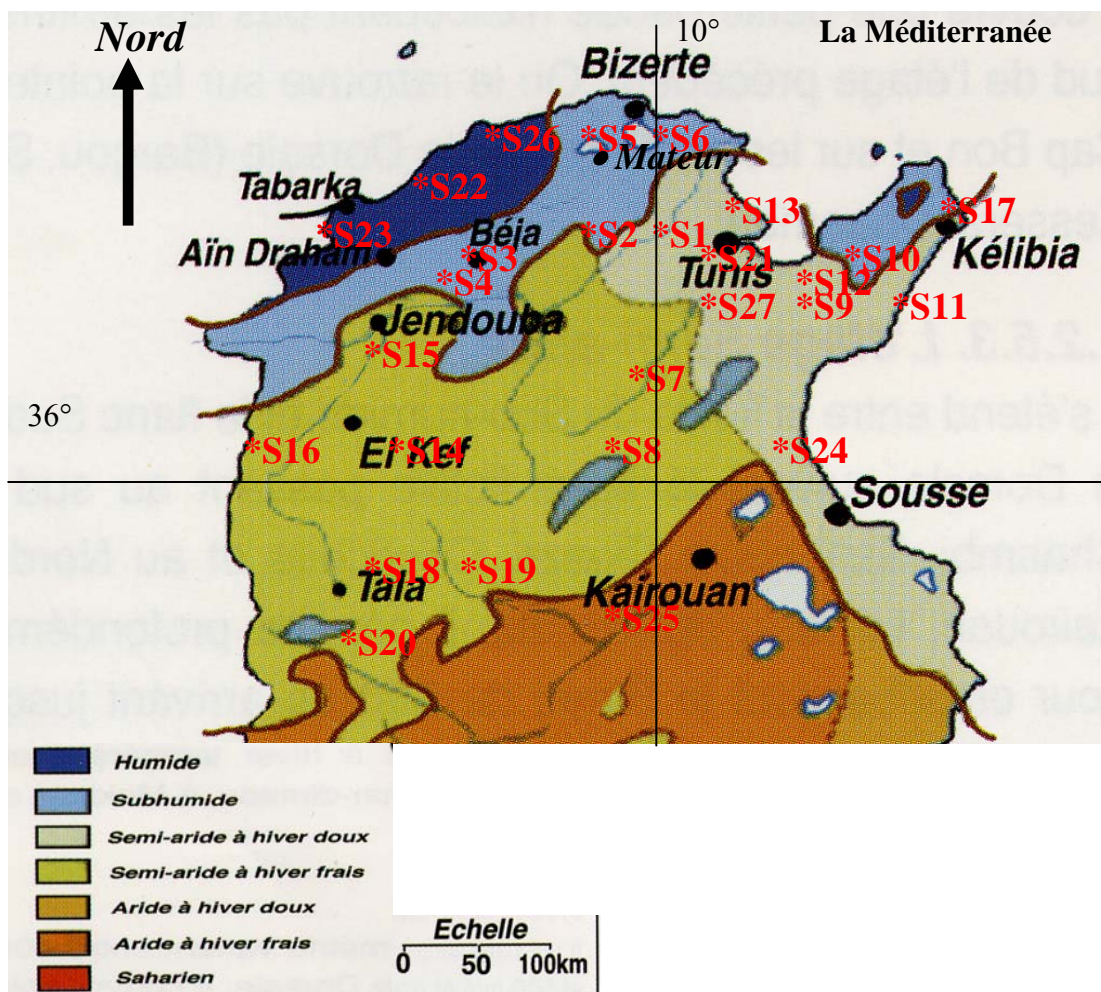


Figure 10 Répartition des sites de collecte des sullas spontanés (Si) dans la Tunisie septentrionale

Ces cartes ont permis de localiser l'espèce dans les groupements botaniques spécifiques et faciliter ainsi la prospection et la collecte ultérieurement.

Les visites sur le terrain ont démarré début mars 1992 jusqu'au 15-05-92, pour couvrir toute la zone nord dorsaliennne de la Tunisie. Le marquage des sites écologiques à *sulla* s'est accompagné d'un ensemble d'observations et de notes qui ont intéressé l'environnement de l'espèce.

- La position géographique (latitude et longitude): ces coordonnées ont été mesurées par un GPS (*global positioning satellite*) de marque Garmin Etrex.
 - Le bioclimat: la position géographique du site nous permet de le situer exactement sur la carte bioclimatique (Bortolli *et al.*, 1967) et de définir ainsi le climat correspondant.
 - Le relief: pour cela, nous avons fait appel à une carte topographique (Belkhoja *et al.*, 1973) selon la même procédure que le bioclimat.
 - La vocation agricole du site: la carte de qualification des terres établie par Dumont en 1967 avait servi à déterminer la vocation agricole de chaque site.
 - Le type de sol ou substrat type: nous avons utilisé pour cela la carte pédologique (Belkhoja *et al.*, 1973). Les coordonnées géographiques des sites avaient été utiles pour la localisation des sites sur la carte correspondante.
 - Le stade de développement: au moment de la prospection, nous avons noté le stade atteint par chaque population (ramification, floraison, formation de gousses...).
 - La présence ou non de pâturage: cette observation a été faite en parcourant tout le site afin de déceler des traces de piétinement ou de matière fécale animale.
 - L'architecture ou port des plantes: l'architecture des plantes a été mesurée selon l'angle que font les tiges secondaires par rapport à la principale:
-
- SO: plante strictement orthotrope, toutes les tiges partent presque d'un même point (collet) et se développent parallèlement à la tige principale;
 - O: plante orthotrope, les tiges secondaires poussent inclinées par rapport à la principale en faisant un angle variant de 45 à 60°;
 - M: plante mixte, ce type de *sulla* développe aussi bien des tiges dressées que des tiges presque horizontales, donc faisant un angle d'environ 90° par rapport à la tige principale;
 - SP: plante strictement plagiotrope, dans ce cas il n'y a presque pas de tige centrale, toutes les tiges se développent parallèlement à la surface du sol; et
 - P: plante plagiotrope, la tige principale ne dépasse pas la hauteur de 20-30 cm. Alors que, toutes les autres tiges sont horizontales (figures 11 et 12).

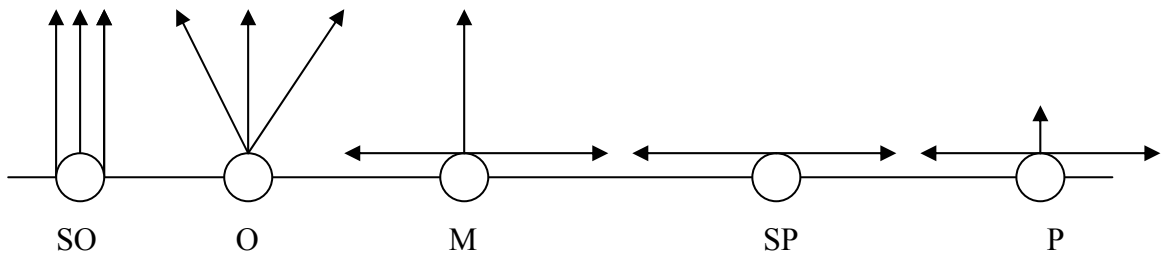


Figure 11 Système architectural des tiges des populations du sulla spontané
SO: strictement orthotrope; O: orthotrope; M: mixte; SP: strictement plagiotrope; P: plagiotrope



Photo 12 Diversité architecturale des tiges dans l'espèce *Hedysarum coronarium* L.. A gauche, un modèle de plante de sulla du nord strictement plagiotrope, et à droite le type orthotrope

Cette prospection a permis de prévoir la ou les périodes éventuelles pour la collecte ultérieure des semences, sur la base du stade de développement des plantes.

1. 1. 2. Collecte du germoplasme sulla du nord

L'itinéraire suivi pour la collecte a été basé sur l'utilisation des cartes aussi bien routière que phyto-écologique afin de bien situer les sites à sulla.

La collecte des semences en gousses a été réalisée au stade maturité. La différence de développement entre les divers génotypes prospectés a été utile pour la répartition des dates de collecte. De cette manière, le risque de perte de semences par égrainage est réduit. Cette action a débuté fin mai pour se prolonger jusqu'au 07-07-92.

La collecte de semences à partir de plantes spontanées doit se faire rapidement afin d'éviter toute chute de gousses par égrainage ou de graines par déhiscence (Engels *et al.*, 1995). Dans certains cas, nous avons eu recours au ramassage des gousses tombées au sol.

Lors de la collecte, certains sites se trouvaient modifiés et ne contenaient plus de sulla spontané malgré leur présence indiquée sur la carte phyto-écologique. Le labour du sol de la végétation naturelle pour les semis est un fait rencontré de plus en plus. La conséquence est une disparition des génotypes sauvages de sulla. Donc une érosion génétique se manifeste déjà et peut parfois être irréversible. Les causes déjà observées figurent parmi celles citées par WCMC (1992).

Les sites de collecte sont présentés au tableau 6.

Tableau 6: Origine des sites géographiques de collecte des populations spontanées de *Hedysarum coronarium* L.

Populations	Sites géographiques
S1	Sidi Médien
S2	Oued Zerga
S3	Béja
S4	Ksar Mézouar
S5	Tinja-Menzel Bourguiba
S6	Khetmine-Bizerte
S7	Fahs- <i>Tuburbo majus</i>
S8	Saouef-Jbel Fkirine
S9	Béni Khalled-Grombalia
S10	Jbel Sidi Abderrahmène
S11	Menzel Témime-Korba
S12	Bir Dressen-Korbous
S13	Gammarth-Marsa
S14	El Kef
S15	Jendouba-Bousalem
S16	Oued Melliz-Ghardimaou
S17	Kélibia-Haouaria
S18	Kesra
S19	Makthar
S20	Théla
S21	Tunis-Ariana
S22	Nefza
S23	Tabarka
S24	Enfidha
S25	Chérichira
S26	Séjnane
S27	Oued Méliane

En résumé, 27 populations ont été collectées. Elles constituent le *pool* génétique de départ pour le programme d'amélioration du sulla local.

Chaque population était formée par un ensemble de gousses récoltées en moyenne à partir de 50 à 60 plantes différentes.

1. 2. Etude de la variabilité germinative des sullas collectés

Amenées au Laboratoire de Productions Fourragère et Pastorale de l'INAT à Tunis, les semences de chaque lot ont été décortiquées et nettoyées par une série de tamisages. Les semences de chaque population ont été réparties en deux lots. Un lot avait servi à la multiplication et l'évaluation ultérieure, et l'autre a été conservé à une température de 4 à 5°C et à l'obscurité.

Avant les semis prévus pour le mois d'octobre 1992, certains essais ont été réalisés.

1. 2. 1. Détermination du poids de mille graines

Faute de référence ISTA au moment du démarrage de l'essai, qui préconise pour ce paramètre le prélèvement de 100 graines x 8 répétitions, donc 800 graines en tout (ISTA, 1999), nous étions obligés de suivre une méthode élaborée au Laboratoire de Productions Fourragère et Pastorale de l'INAT. Pour cela, nous avons prélevé au hasard de chaque population 3000 graines. Ces graines ont été réparties en lots de 1000 graines chacun. Les pesées ont été réalisées par une balance de marque Sartorius (+/- 0,01 g). Le poids est déterminé en gramme.

1. 2. 2. Détermination de la capacité germinative

Un essai de germination des diverses populations à des températures allant de 5 à 35°C (en augmentant chaque fois la température de 5°C), a été réalisé dans le but d'étudier le comportement germinatif de chaque population face à cette variation.

Pour chaque température, quatre lots de 100 graines chacun ont été mis dans une boîte de pétri de 12 cm de diamètre avec papier filtre double de marque pb Papelera del Besos. Le dispositif expérimental a été complètement randomisé avec 4 répétitions. La germination a été faite dans une étuve réfrigérée de marque Kottermann 2771 et à l'obscurité. La durée d'incubation a été de 15 jours. Le comptage de la germination a été réalisé tous les jours. En fin du test de germination, nous avons déduits les graines dures et avariées.

Le sulla du nord (*Hedysarum coronarium* L.), ne figure pas parmi les espèces listées par ISTA qui exigent de lumière pour la germination (ISTA, 1999).

1. 3. Mise au point des techniques de conservation des semences du sulla du nord

Vu que la quantité des graines collectées n'est pas suffisante pour tous les essais, nous avons utilisé pour l'essai conservation, des semences de sulla Sgaravatti d'origine italienne.

Le choix des températures de conservation et des humidités de semences reflètent certaines conditions de conservation encore pratiquées, malgré les échecs souvent constatés au niveau du maintien d'une bonne germination. Pour cela:

- quatre températures ont été utilisées, il s'agit de -18, +5, +20 et la température ambiante en degrés Celsius; et
- quatre humidités des graines: 4, 8, 13 et 21 %. Tout d'abord, on a déterminé l'humidité initiale des graines par une balance à dessiccation infrarouge de marque Sartorius. Cette humidité représente l'humidité relative des graines au démarrage de l'essai qui a été de 8 %.

Les diverses humidités ont été déterminées par une série de déshydratation et hydratation des graines mise au point par le Laboratoire de Productions Fourragère et Pastorale de l'INA Tunisie.

- Déshydratation des graines:

Pour la déshydratation des graines, on a utilisé le silicagel comme agent absorbant l'humidité. Au fond de chaque tube à essai, on a versé 6 g de silicagel (ce qui représente 4 fois le poids des graines). Avant de mettre l'équivalent de 300 graines de sulla, on couvre le silicagel par du papier filtre. Le tube a été ensuite hermétiquement fermé. Après 2 semaines, l'humidité des graines a passé de 8 à 4 %. Les durées de déshydratation des graines par cette technique ont été déterminées suite à une série d'essais préliminaires qui nous ont permis de mettre au point un abaque montrant la durée de temps nécessaire pour baisser l'humidité des graines de 1 % chaque fois.

- Hydratation des graines:

Le carbonate de calcium (CaCO_3) déshydraté a été utilisé comme agent de rétention de l'eau. Dans un mortier en porcelaine, on a mélangé soigneusement 120 g de CaCO_3 avec 12 g d'eau distillée. on a mis l'ensemble dans une boîte de pétri à fermeture hermétique de marque Pyrex et de 7 cm diamètre.

Dans un boudin en membrane de dialyse du groupe cellulose, fortement hydrophile, de 1 cm de diamètre et 5 cm de long, on place 300 graines de sulla. Les deux bords sont soigneusement scellés à la main. Le boudin a été ensuite enterré dans le CaCO_3 humide avant de fermer hermétiquement la boîte. Après 6 heures, le boudin contenant les graines est retiré du CaCO_3 . Cette durée a été suffisante pour que les graines absorbent de l'humidité passant du CaCO_3 humide à travers la membrane et deviennent à 13 % d'humidité. Une humidité de 21 % a été obtenue après un séjour de 23 heures.

La combinaison des diverses températures (-18°C, +5°C, +20°C et température ambiante) avec les humidités des graines (4 %, 8 %, 13 % et 21 %) permet d'avoir 16 traitements. Chaque traitement est représenté par un ensemble de 20 tubes contenant chacun 300 graines et fermés hermétiquement. Dans ces conditions, les diverses humidités ont été maintenues stables durant toute la période de l'essai.

Les durées de conservation ont varié de 10 à plus de 1800 jours. Au terme de chaque période de conservation, chaque traitement a comporté 3 boîtes à pétri de 12 cm de diamètre contenant chacune 100 graines étalées sur du papier filtre double de marque pb papeleria del Besos et imbibé d'eau distillée. La germination des graines a été déterminée après incubation de 14 jours dans une étuve réfrigérée de marque Kottermann, à une température de 20°C et à l'obscurité.

2. CARACTERISATION DES SITES DES ESSAIS EXPERIMENTAUX

2.1. Site de Tunis-INAT

Trois essais parallèles ont été installés dans ce site :

- essai 1: caractérisation des populations spontanées du sulla du nord;
- essai 2: sélection et évaluation du sulla du nord local; et
- essai 3: systèmes de rotation à base de sulla du nord.

Ces essais sont considérés de type longue durée. Pour cela, il est utile de décrire les caractéristiques pédo-climatiques de cette station en détail. Ainsi, l'évolution des pluies et des températures mensuelles durant la période de l'essai (1990-1999) a été comparée avec les données climatiques moyennes représentatives du site en question (Station bioclimatique de l'INA Tunisie).

2.1.1. Situation géo-édaphique du site

Le site expérimental qui a abrité les 3 essais est situé à une altitude de 10 m et caractérisé par la latitude 36°62' N et la longitude 10°20' E. Le sol est de type argilo-calcaire d'apport alluvial (Belkhoja *et al.*, 1973).

Les caractéristiques physico-chimiques du sol sont illustrées au tableau suivant:

Tableau 7 Spécificités physico-chimiques du sol du site de Tunis-INAT (N'cib, 1991)

P: profondeur du sol; A: argile; Lm: limon; S: sable; MO: matière organique; Nt: azote total; Ph: P₂O₅; K: K₂O; Ca: calcaire total; da: densité apparente; pH (H₂O): acidité

P(cm)	A	Lm	S	MO	Nt	Ph	K	Ca	da	pH (H ₂ O)
	%									
0-30	38	28	30	1,15	0,11	0,04	0,08	15	1,65	7,75
30-60	41	25	21	0,95	0,08	0,03	0,05	18	1,65	7,98

La pauvreté en matière organique du sol (1,15 %) est une contrainte à la bonne croissance des plantes. Un taux inférieur à 3 % ne permet pas au sol de retenir suffisamment d'humidité surtout en période de déficit hydrique.

La dominance de l'argile dans la composition du sol favorise une bonne rétention de l'eau, mais cet avantage se trouve diminué par la faible teneur en matière organique du milieu. En effet, la capacité d'échange cationique de la matière organique est de 280 meq/100 g, alors que celle de l'argile est en général inférieure à 10 meq/100g (Resck *et al.*, 1991). Ce type de sol relativement compact présente l'inconvénient de former une croûte de battance superficielle gênant les levées surtout quand une pluie est suivie d'une période de sécheresse. Cette particularité du sol s'apprête bien à l'essai systèmes de rotation afin de tester la réponse du sol et des cultures aux diverses rotations.

2. 1. 2. Situation climatique

Quant à la situation climatique, la station appartient à l'étage bioclimatique du semi-aride supérieur à hiver doux (Bortolli *et al.*, 1967). Les températures moyennes annuelles n'ont pas une grande signification, vu la variabilité mensuelle et annuelle. Le mois le plus froid est janvier (10,5°C) avec une moyenne minimale de 2,2°C. (figure 13.)

Cependant, des températures plus basses (< 0°C) peuvent survenir certaines années comme c'était en 1981 avec -1,7°C en janvier. Les maxima de température sont signalés au mois d'août (32,4°C). Les écarts thermiques entre les jours et les nuits sont assez élevés allant de 13 à 29°C.

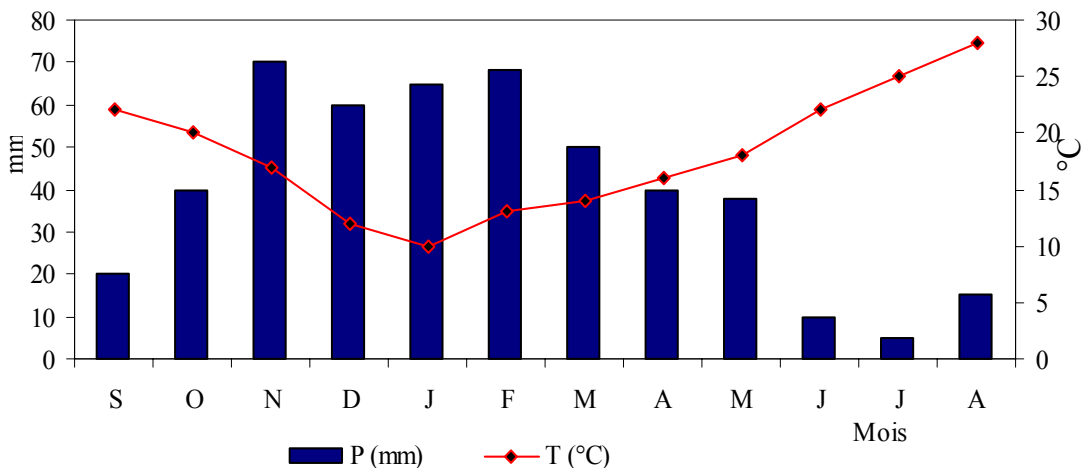


Figure 13 Répartition mensuelle de la hauteur des pluies (mm) et de la température (°C) moyennes sur 60 années (1929-1989) du site expérimental de Tunis-INAT (INM Tunisie, 1995)

Par rapport aux moyennes des températures de la station de Tunis sur une durée de 60 ans (T60), les températures annuelles et saisonnières de la décennie 1990-1999 se sont trouvées à un niveau légèrement supérieur à T 60. En effet, la période estivale (juin, juillet, août) a enregistré une augmentation de +1,7°C. En automne, cet écart s'est trouvé moins élevé avec +0,6°C (figure 14). Les données décennales futures pourraient confirmer ou non ces premières observations.

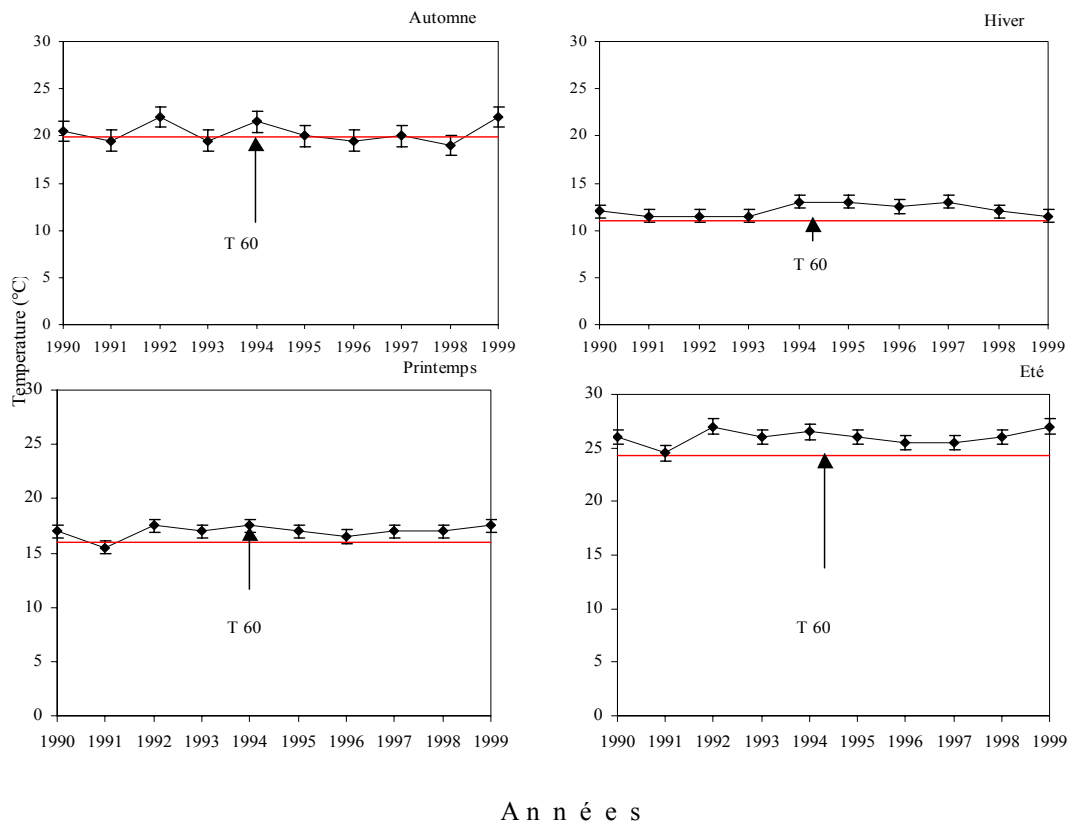


Figure 14 Comparaison de la température moyenne annuelle de la décennie 1990-1999 par saison de la station de Tunis-INAT avec la température moyenne sur 60 ans (T60)

La pluviométrie a marqué aussi une variation tant saisonnière qu'annuelle (figure 15). Bien que la moyenne annuelle sur 60 années (P60) soit de 498 mm, la moyenne des pluies enregistrées durant la décennie 1990-1999 a été de 448 mm. Dans les régions semi-arides et arides, une baisse de la hauteur des pluies de 50 mm peut être considérée comme importante. Sur les dix années, seulement 2 années ont reçu une hauteur de pluie au moins égale à 498 mm. En 1990, les quantités de pluies reçues ont atteint 704 mm dont 70 % se trouvaient concentrées entre novembre et janvier. En cette période, où la température et l'évaporation se trouvaient relativement basses avec une demande en eau par les cultures assez modérée, l'excès des pluies peut provoquer dans certaines situations des conditions d'hydromorphie néfastes et un lessivage important des sols.

Partie 2

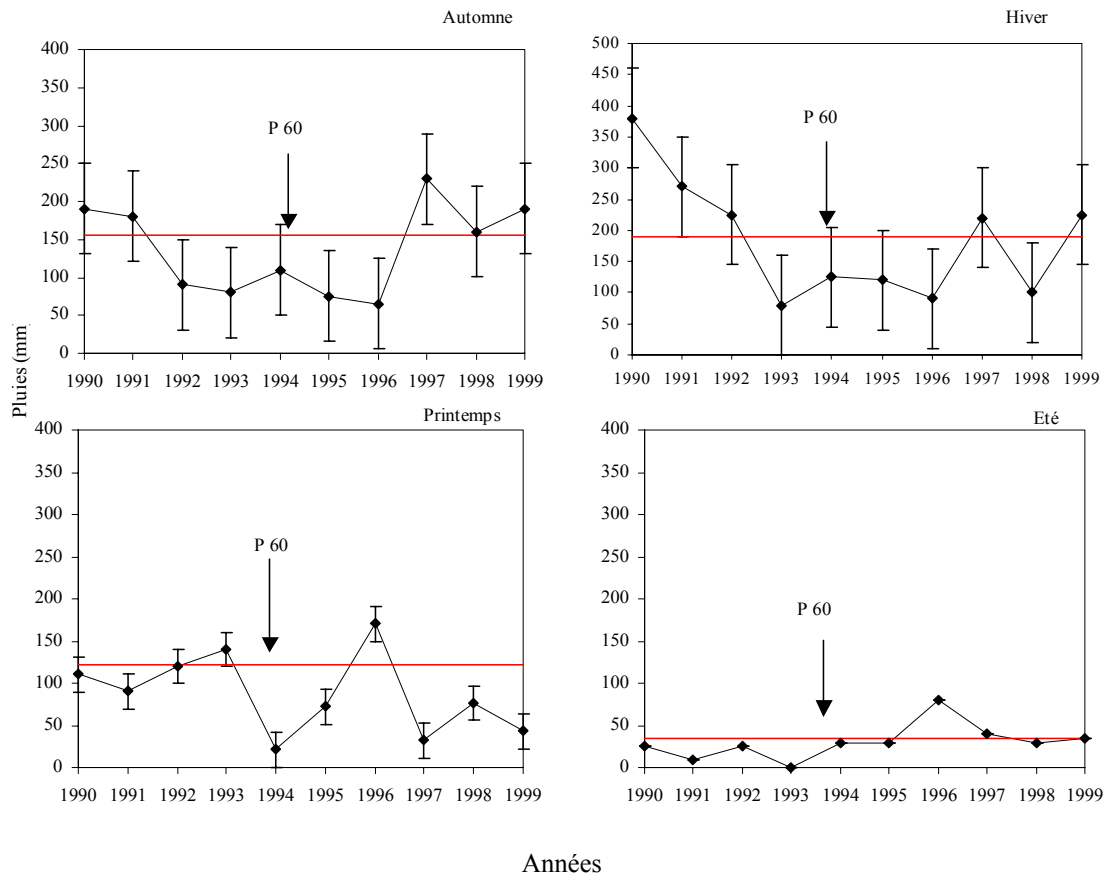


Figure 15 Variation de la hauteur moyenne des pluies annuelles par saison de la station de Tunis-INAT durant la décennie 1990-1999 par rapport aux moyennes des pluies sur 60 ans (P60)

A titre indicatif, il a été enregistré seulement 21 mm de pluie en 1994 et pour la saison printanière (mars, avril, mai). Bien que la moyenne pluviale pour cette période sur 60 ans soit de 122 mm. Les années 1994, 1995, 1997, 1998 et 1999 n'ont reçu respectivement que 21, 72, 32, 76 et 43 mm (figure 15). Cette baisse des pluies considérées comme néfastes pour des cultures conduites en régime pluvial influe négativement sur la production des grandes cultures et en particulier les céréales qui occupent annuellement des emblavures estimées à 1 500 000 ha dont la majorité est non irriguée (M.A.E.R.H., 2002).

Cependant, le déficit climatique défini comme la différence entre les pluies et l'évapotranspiration potentielle varie de 640 à 980 mm. Ce déficit d'eau est à apporter au moins par irrigation au moment critique ou dans certains cas par la nappe phréatique.

Dans des circonstances pareilles où les paramètres climatiques prélevées entre 1990 et 1999 et comparés à une moyenne sur 60 années ont montré une certaine baisse des apports d'eau par les pluies en période cruciale pour les cultures, des questions doivent être posées à présent sur l'avenir des systèmes de culture pratiqués. Les espèces et les variétés actuelles sont-elles en mesure de supporter un tel changement? les techniques culturales présentes sont-elles adaptées à cette situation? comment faire, pour remédier à ce changement des conditions naturelles? Et enfin, les ressources phytogénétiques locales sont-elles suffisamment protégées pour éviter le risque d'une érosion génétique?

La productivité d'un système quelconque ne peut être bonne que si l'ensemble de ses activités fonctionne en parfaite harmonie avec l'environnement du système en question. De ce fait, le choix de l'espèce du présent travail n'est pas du hasard. En effet, il a été fait en fonction des contraintes agronomiques et environnementales constatées par le Laboratoire de Productions Fourragère et Pastorale de l'INA Tunisie, depuis 1980. L'introduction dans les systèmes de culture de génotypes améliorés dans des conditions naturelles locales devient une priorité inévitable pour garantir leur durabilité.

2. 2. Sites de l'essai interaction sulla du nord avec l'environnement

L'essai d'évaluation des sullas sélectionnés a été installé dans deux sites bioclimatiques différents. Le premier est Tunis-INAT (figures 13, 14, 15) qui est situé dans le semi-aride, et le second est Mateur qui appartient au bioclimat subhumide (Bortolli *et al.*, 1967).

L'année d'installation de l'essai pour le site de Tunis-INAT (1996), a été marquée par un déficit pluvial automnal au mois de novembre et décembre respectivement de -35 et -42 mm. Ceci a affecté négativement la levée et l'installation des sullas.

La température moyenne mensuelle minimale est plus basse à Mateur (7,2°C) (figure 16) que Tunis (10,5°C) (figure 13). Cependant, le nombre de jours dont les minima sont inférieurs à 7°C est beaucoup plus élevé à Mateur (125 jours) (tableau 8).

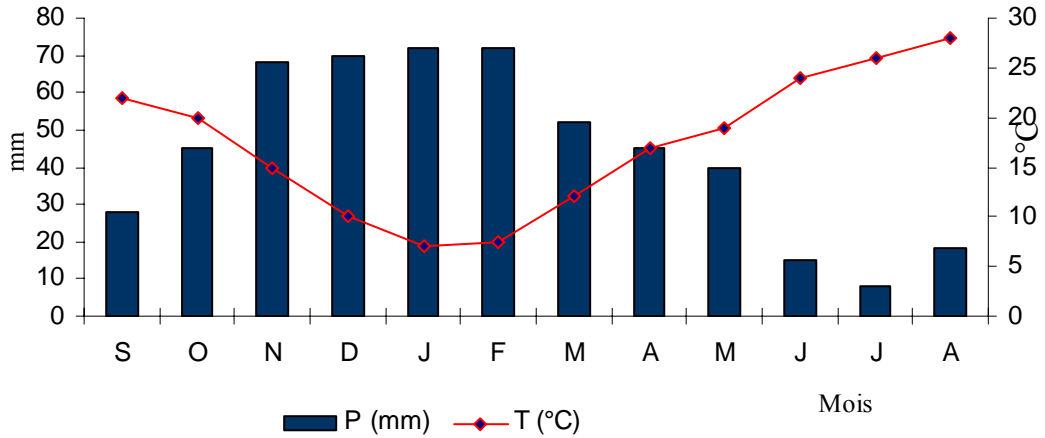


Figure 16 Répartition mensuelle de la hauteur des pluies (mm) et de la température (°C) moyennes sur 60 années (1929-1989) du site expérimental de Mateur (INM Tunisie, 1995)

Il est à signaler que le risque de déficit pluvial à Mateur est plus faible comparé à celui de Tunis-INAT. En effet, l'amplitude pluviale annuelle de Mateur est comprise entre 400 et 800 mm alors que celle de Tunis-INAT varie de 80 à 700 mm.

Tableau 8 Caractéristiques édapho-climatiques des sites expérimentaux de Tunis-INAT et Mateur (N'cib, 1991; Sanaa, 1993)
 J<7: nombre de jours de l'année où les minima de température sont inférieurs à 7°C, Pl: pluviosité annuelle moyenne sur 60 ans, P: profondeur en cm; da: densité apparente, MO: matière organique, N: azote total, Ph: phosphate sous forme de P₂O₅, K: potassium sous forme de K₂O, A: argile, Lm: limon et S: sable

Sites	P cm	J (<7°C)	Pl mm	da	pH (H ₂ O)	MO	N	Ph	K	A	Lm	S
Tunis	25	30	450	1,25	7,90	1,40	0,11	0,034	0,06	40	25	33
Mateur	25	125	533	1,44	8,50	2,08	0,09	0,002	0,07	38	50	12

La parcelle de l'essai interaction sulla-environnement de Tunis-INAT s'est caractérisé par un sol de type argilo-calcaire d'apport alluvial et riche en limon. Le pourcentage de matière organique dans la couche du sol 0-25 cm est de l'ordre de 1,4 %. Cette teneur est supérieure à celle de la parcelle qui a abrité l'essai systèmes de rotation qui est de 1,15 %. Cette valeur reste toujours inférieure à la norme de 3 % requise pour les terres cultivées.

A Mateur, le sol parcellaire est de type limono-argileux d'apport alluvial vertique. Il est profond et homogène (Belkhoja *et al.*, 1973). Les principales caractéristiques chimiques ont montré que ce sol présente un pH élevé (8,5). Son taux de matière organique est plus élevé que celui de Tunis-INAT (2,08 %), mais plus faible en phosphore assimilable (0,002 %).

3. SELECTION DE *Hedysarum coronarium* L. SPONTANEE

3. 1. Programme de la sélection

3. 1. 1. Objectifs de la sélection

La sélection à l'intérieur des populations mères du sulla du nord spontané (*Hedysarum coronarium* L.) a visé l'obtention de génotypes performants et adaptés au milieu local. L'objectif final étant d'utiliser ces génotypes ultérieurement dans les systèmes de rotation avec les céréales.

Il est évident que les plantes à sélectionner ne doivent pas présenter les contraintes du sulla usuel Sgaravatti. Ces contraintes sont principalement:

- une faible teneur en matière sèche et protéines, aux stades bouton floral et floraison. Ceci limite la conservation de la plante par ensilage;
- un diamètre des tiges supérieur à 1 cm, ceci augmente le taux de refus par les animaux à l'auge;
- une installation lente et une croissance hivernale faible qui rendent la culture susceptible à l'envahissement par les plantes indésirables durant la phase juvénile des plantes; et
- une sensibilité à l'oïdium (*Erysiphe trifolii* var. *intermedia* (U. Braun) (U. Braun et S. Takam)) qui rend la plante de moins en moins appréciée par l'éleveur. Il faut d'emblée faire la remarque que la tolérance du sulla à ce champignon est une recherche qui n'a pas été abordée dans ce travail. Seulement, des observations sommaires ont été faites et qui résument le degré de sensibilité des génotypes à ce champignon.

3. 1. 2. Les critères de sélection

La sélection a été réalisée sur 4 générations selon des critères bien déterminés jusqu'à obtention de descendants phénotypiquement homogènes.

3. 1. 2. 1. La génération mère F0 et les descendances F1, F2 et F3

Au sein de générations F0, F1, F2 et F3, les critères de sélection ont concerné des paramètres agronomiques évalués par observation des plantes sur pieds. Cette sélection a intéressé des stades agronomiques connus pour toutes les fabacées fourragères. Ces stades nous renseignent sur la qualité d'installation de la plante (levée et première feuille complète plurifoliolée), en passant par la phase de pleine croissance (ramification et élongation des tiges) jusqu'à la floraison qui représente le stade idéal de coupe. Les critères de sélection sont les suivants:

- le port des plantes: les individus à tiges orthotropes et semi-orthotropes ont été prioritaires par rapport aux plagiotropes. Ces plantes seront efficaces dans la mesure où on vise la mise au point de nouveaux génotypes adaptés à la coupe. Ces derniers pourraient être utilisés comme producteurs de fourrage aux élevages surtout bovin et en même temps des précédents culturels pour les céréales dans des systèmes de rotation. Les plantes prostrées ont été aussi évaluées dans le but de mettre au point des sillas à vocation pâturage;

- la vigueur des plantes: seules les plus vigoureuses ont été gardées. Cette vigueur a été évaluée selon l'évolution dans le temps de la hauteur de végétation hivernale (janvier) et printanière (avril), la surface foliaire au stade floral, et la densité foliaire selon le nombre de feuilles par tige au stade floral;

- la ramification représente un indicateur de croissance et de production important pour la sélection. L'estimation du nombre de rameaux durant le cycle de développement de la culture, nous a permis de sélectionner les plantes les plus ramifiées. Ces plantes sont généralement douées d'une bonne croissance; et

- le diamètre des tiges; ce paramètre représente un indice de qualité du fourrage. Au stade floraison (stade de coupe pour un silla de première année), plus le diamètre des tiges est élevé, plus le fourrage est riche en fibres et cellulose, et donc il est moins digestible. En d'autres termes, la valeur nutritive d'un fourrage se trouve en corrélation négative avec sa richesse en cellulose.

Souvent, un fourrage fin et tendre est mieux apprécié et plus digestible par les ruminants. Dans un pâturage de silla, Semadeni (1976) a montré que les animaux broutent les feuilles et laissent les grosses tiges lignifiées. Le même comportement a été observé avec le napier (*Pennisetum purpureum* Schumach) et le maïs (*Zea mays* L.).

Pour chaque paramètre, une classification des sillas a été faite selon une échelle croissante allant de 1 jusqu'à 10 c'est à dire des meilleures plantes aux plus mauvaises. Cette numérotation subjective a été de même utilisée pour des paramètres comme les biomasses produites hivernale et printanière, la densité de végétation au stade floral et le niveau d'infestation foliaire par l'oïdium (annexe, tableaux III a et b).

3. 1. 2. 2. La génération de sélection F4

Dans cette génération, l'estimation a intéressé des paramètres de sélection de type quantitatif et qualitatif. Pour ce dernier type de paramètres, le recours à la méthode de coupe a été nécessaire pour évaluer la biomasse, les protéines brutes, la digestibilité de la matière organique, et la cellulose brute. Le prélèvement de plantes à des stades particuliers a été aussi indispensable pour déterminer le rapport feuilles sur tiges et les surfaces foliaires.

3. 1. 3. Méthodologie de la sélection

La méthode de sélection récurrente phénotypique individuelle et familiale demi frère (les meilleurs individus ont été sélectionnés dans les meilleures familles) a été appliquée pour l'amélioration des populations spontanées de *Hedysarum coronarium* L.. Cette méthode valable pour des espèces allogames a été décrite par Gallais, (1990); NAL, (1992); Moreno-Gonzalez et Cubero, (1993). L'amélioration du germoplasme de départ très hétérogène a nécessité une série de générations sélectionnés selon un taux de sélection évalué à 0,75 % ce qui correspond à un indice de sélection de 2,761 (Falconer, 1981), afin d'atteindre une homogénéisation progressive des générations. De ce fait, le nombre de génération peut varier d'une espèce à l'autre mais surtout du degré d'homogénéité souhaité dans la génération de sélection.

Les étapes de cette sélection sont :

- étape 0 (1992-93): le groupe génétique de départ est composé de 27 populations ou familles spontanées (F0). Au cours de la campagne 1992-93, seulement 10 plantes par famille ont été sélectionnées sur la base des critères de sélection préétablis. Ces plantes ont été gardées jusqu'à floraison en fécondation libre pour la production de semences.

- étape 1 (1993-94): la descendance (F1) a donné 10 x 27 familles donc 270 descendants. Cette nouvelle génération a été semée la deuxième année (1993-94). Une certaine variabilité inter- et intra-familiale a marqué cette génération. Au cours de ce cycle, certaines familles ont été éliminées directement du programme de sélection vu qu'elles ne répondent pas aux critères de sélection. Uniquement 20 familles ont été gardées. Ces 20 familles ont manifesté encore une certaine variabilité interne. La deuxième étape de sélection selon les mêmes critères a permis de garder seulement 50 plantes de l'ensemble des 20 familles. Ces meilleurs individus ont été laissés encore une fois en fécondation libre (figure 17).

Schéma de sélection	Année	Nombre de familles sélectionnées	Nombre de plantes sélectionnées
	1992-93 génération F0	27	10/famille
	1993-94 génération F1	20/270	50/20 familles
	1994-95 génération F2	11/20	17/11 familles
	1995-96 génération F3	17	1/famille
	1996-97 génération F4	17	

Figure 17 Schéma de sélection récurrente phénotypique individuelle et familiale demi-frères sur 4 générations des populations du sulla sauvage (*Hedysarum coronarium* L.)

- étape 2 (1994-95): les graines de chaque plante ont été semées le cycle d'après (1994-95) pour donner 50 nouvelles familles (F2). Au cours de ce cycle, une certaine homogénéité a commencé à s'installer à l'intérieur de chaque famille. Dans ce cas, et après évaluation des descendance selon les mêmes critères, seules 17 plantes ont été sélectionnées. Ces 17 plantes ont été gardées en fécondation libre pour donner 17 nouvelles familles. Ces familles représentent la descendance des meilleures plantes issues des meilleures familles se sont caractérisées par une grande homogénéité intra-familiale.

- étape 3 (1995-96): l'évaluation de ce *pool* génétique formé de 17 génotypes (F3) a été faite dans le même site que celui de la sélection précédente. Malgré l'homogénéité observée à l'intérieur de chaque famille, nous avons poussé la sélection pour garder seulement les meilleures plantes de chaque famille, toujours selon les mêmes critères.

- étape 4 (1996-97): le semis de la descendance des 17 plantes a été réalisé dans le même site écologique et maintenu par des croisements libres. Cette génération (F4) a représenté la descendance des meilleurs individus des meilleures familles.

Dans ce programme de sélection, le *sulla* Sgaravatti a été incorporé dans tous les dispositifs comme témoin et éliminé juste avant l'épanouissement des hampes florales afin d'éviter toute contamination des plantes sélectionnées par le pollen du témoin. L'allogamie existante au sein de l'espèce *Hedysarum coronarium* L., facilite la fécondation croisée de type entomophile et le transfert de pollen entre les plantes. Le fait de garder le témoin en floraison peut provoquer des croisements non contrôlés entre les plantes sélectionnées. Ceci entraîne l'apparition de descendants mixtes (génotypes locaux /Sgaravatti), chose que nous devons éviter dans notre programme de sélection.

3. 2. Installation des essais

3. 2. 1. Essai de sélection du *sulla* du nord spontané

Les 27 populations collectées du *sulla* du nord (*Hedysarum coronarium* L.) (F0), ont été semées dans le site de Tunis-INAT, le 27 Octobre 1992, selon un dispositif expérimental complètement aléatoire à 3 répétitions. Ce dispositif s'adapte mieux que d'autres au présent essai vu le nombre relativement élevé des populations. Chaque génotype est représenté par un double rangé de 6 m de long espacé de 0,4 m soit au total 2 lignes x 3 répétitions donc 6 lignes par population.

La dose de semis habituellement recommandée pour le *sulla* est de 2 g/m² pour une densité de 80 plantes/m² (Villax, 1963; Semadeni, 1976). Mais en raison de la diversité des poids de mille graines des populations, les doses de semis que nous avons appliqué sous forme de graines en gousses ont varié de 1,6 à 2,8 g/m², soit une moyenne de 2 g/m² (0,5 à 0,8 g/m² de graines décortiquées).

Jusqu'au stade ramification (100-110 jours après semis), il a été encore possible de distinguer les plantes séparément. Au-delà de cette période, la densité de plantes réelles n'est plus à 80 plantes/m² mais elle se situe entre 30 et 45 plantes/m². Selon les critères de sélection précités, l'élimination des plantes indésirables dès les premières phases de la culture a permis d'aboutir à un nombre de plantes réduit (5 à 7 plantes/m²) jusqu'à la floraison.

3. 2. 2. Essai diversité biologique des populations spontanées du sulla du nord

Dans cet essai, les populations de sulla ont été semées selon le même dispositif expérimental que celui du programme de sélection et dans le même site. La longueur des lignes de semis a été limitée à 3,5 m vu l'insuffisance des quantités de semences disponibles.

3. 3. Evaluation de la diversité génotypique des populations spontanées du sulla du nord

L'évaluation des populations spontanées a intéressé une série de paramètres qui ont touché aussi bien la semence que la plante entière. Les paramètres mesurés se divisent en groupes.

3. 3. 1. Paramètres non-destructifs de la végétation

3. 3. 1. 1. Paramètres liés à la semence

Les paramètres mesurés sont :

- PMG: poids de mille graines (g).

Ce paramètre a été déterminé à partir de l'essai 1. 2. 1.

- G05: germination à 05°C (% de graines germées);
- G20: germination à 20°C (% de graines germées); et
- G35: germination à 35°C (% de graines germées).

La germination des graines à ces températures a été réalisée dans des boîtes de pétri de 12 cm de diamètre avec papier filtre double de marque pb Papelera del Besos. Chaque traitement a englobé quatre boîtes de 100 graines chacune, réparties selon un dispositif expérimental complètement randomisé avec 4 répétitions. L'incubation des boîtes d'une durée de 15 jours, a été faite dans une étuve réfrigérée de marque Kottermann 2771 et à l'obscurité. Le comptage des graines germées a été réalisé tous les jours.

- TOG: température optimale de germination (°C):

La température optimale de germination des semences a été déduite de l'essai 1. 2. 2.. Dans ce cas, nous avons prélevé la température dans la quelle nous avons eu le maximum de germination.

- TGD: taux de graines dures à la température de germination optimale (%):

En fin du test de germination à la température optimale, nous avons déduis le pourcentage des graines qui n'ont pas absorbé de l'eau donc considérées comme des graines dures (ISTA, 1999).

3. 3. 1. 2. Paramètres de croissance

- SFC: surface cotylédonaire (cm²);

- SFU: surface foliaire de la première feuille (cm²);

- SFI: surface foliaire à l'installation au stade 1^{ère} feuille (cm²/plante);

- SFH: surface foliaire hivernale au mois de janvier (cm²/plante); et

- SFP: surface foliaire printanière au mois d'avril (cm²/plante).

Les surfaces foliaires ont été déterminées sur le terrain par un planimètre électronique portable de marque Licor 3000. Les feuilles ont été passées une à une et sans qu'elles soient arrachées de la plante. La surface cumulée a été déterminée en cm²/plante.

- HVH: hauteur de végétation (plante) hivernale au mois de janvier (cm);

- HVP: hauteur de végétation (plante) printanière au mois d'avril (cm);

- LRF: longueur des rameaux primaires au stade floraison (cm);

- LTH: longueur de la tige principale hivernale au mois de janvier (cm);

- LTP: longueur de la tige principale printanière au mois d'avril (cm); et

- LTF: longueur finale de la tige principale (cm).

Les longueurs respectives ont été mesurées soit par un herbomètre artisanal mis au point au Laboratoire de Productions Fourragère et Pastorale de l'INAT, soit par une règle plate graduée en cm.

- TRF: nombre de rameaux primaires et secondaires au stade floraison; et

- TRT: taux de ramification tertiaire (%): ce paramètre représente le rapport entre le nombre des tiges tertiaires sur le nombre total des tiges.

3. 3. 2. Paramètres destructifs de la végétation: les coupes

3. 3. 2. 1. Paramètres quantitatifs

- BSH: biomasse sèche hivernale au mois de janvier (g/m linéaire); et
- BSP: biomasse sèche printanière au mois d'avril (g/m linéaire).

Le fourrage hivernal a été coupé à une hauteur de végétation de 40-50 cm, alors que la coupe printanière a eu lieu au stade floraison (avril).

Pour cela, les côtés de chaque ligne (0,5 m de part et d'autre), ont été coupés mais non compris dans les estimations des biomasses. Le reste de chaque ligne et répétition (2,5 m), a été coupé par une faucille et pesé sur place par une balance de terrain de marque OHAUS DS (+/- 100 g). Cette récolte représente la biomasse fraîche produite.

Un échantillon de 500 g a été prélevé de chaque pesée pour la détermination du poids sec. Ces échantillons ont été mis dans une étuve à ventilation de marque Jouan à une température de 80°C. Une première pesée de la matière sèche a été faite après 48 h, puis une deuxième après 72 h jusqu'à stabilisation du poids. Le rapport poids sec sur poids frais, nous a permis de déterminer le taux de matière sèche.

La biomasse sèche a été déterminée après multiplication du taux de matière sèche par la biomasse fraîche.

3. 3. 2. 2. Paramètres qualitatifs

- TSH: taux de matière sèche en hiver (janvier) (%); et
- TSP: taux de matière sèche au printemps (avril) (%).

Les taux de matière sèche ont été déterminés selon la méthode décrite précédemment.

- DTP: diamètre des tiges (cm): ce paramètre a été mesuré au stade floraison par un pieds à coulisse (+/- 0,1 mm).

- FTH: rapport feuilles sur tiges hivernales (janvier); et
- FTP: rapport feuilles sur tiges printanières (avril).

Les même échantillons qui avaient servi à la détermination des taux de matière sèche ont été utiles pour calculer les rapports feuilles sur tiges. Avant de dessécher ces échantillons, nous avons séparé les feuilles des tiges et pesé séparément avec une balance monoplateau de marque Mettler (+/- 0,1 g).

3. 3. 2. 3. Paramètres foliaires

- LFM: longueur de la feuille médiane plurifoliolée (cm): cette feuille a été mesurée au stade floraison par une règle graduée en cm.
- TFM: rapport longueur sur largeur des folioles: les feuilles ont été prélevées des échantillons coupés au stade floral. Les mesures des folioles ont été réalisées par un pied à coulisse ($\pm 0,1$ mm) en tenant compte du point le plus large de leurs largeurs.
- TCP: rapport longueur sur largeur cotylédonaire: la taille des cotylédons a été mesurée après la levée des plantes selon la même procédure que précédemment.

3. 3. 2. 4. Paramètres floraux

Les paramètres suivants ont été déterminés sur les échantillons coupés au stade floral.

- LIF: longueur des inflorescences (cm): les inflorescences ont été mesurées par une règle graduée en cm depuis le point de départ de l'inflorescence (fin du pédoncule floral) jusqu'à l'extrémité de la dernière fleur.
- NFI: nombre de fleurs par inflorescence: sur les mêmes échantillons, nous avons compté le nombre de fleurs total épanouies.
- TEF: longueur sur largeur de l'étendard;
- TAF: longueur sur largeur de l'aile;
- TCF: longueur sur largeur de la carène; et
- LEF: longueur des étamines.

Les fleurs proviennent des inflorescences précédentes. Les longueurs des différentes parties de la corolle ainsi que les étamines ont été mesurées par un pied à coulisse ($\pm 0,1$ mm).

3. 4. Evaluation de la génération F4 de sélection

Après quatre cycles de sélection selon les critères préétablis (3. 1. 2.), 17 génotypes ont été retenus (F4) pour les tests d'évaluation ultérieure.

3. 4. 1. Détermination de quelques paramètres génétiques

Pour mettre en évidence l'importance du génotype dans l'expression d'un certain caractère étudié au sein de cette génération, la détermination des héritabilités H (Knapp *et al.*, 1987) permet de montrer si un caractère est héritable ou non.

Seulement, pour les allogames comme le sulla, l'héritabilité déterminée doit l'être au sens large et exprime alors le rapport entre la variance génotypique (σ_g^2) et la variance phénotypique ou totale (σ_p^2) (tableau, 9).

L'analyse statistique de chaque paramètre d'évaluation selon la méthode ANOVA (SAS, 1985), a permis d'établir un tableau d'analyse de variance, à partir duquel on a calculé les diverses variances pour l'héritabilité.

Tableau 9 Modèle de tableau d'analyse de la variance des paramètres mesurés pour l'ensemble des génotypes sélectionnés (F4) du sulla du nord

Sources de variation	ddl	carrées moyens (CM)
génotypes	g-1	$\sigma_e^2 + r \sigma_g^2 = CM_g$
répétitions	r-1	$\sigma_e^2 + g \sigma_r^2$
erreur	(r-1) (g-1)	$\sigma_e^2 = CM_e$

Sachant que: $H = \sigma_g^2 / \sigma_p^2$; avec $\sigma_p^2 = \sigma_g^2 + \sigma_e^2$.

Après avoir remplacé les variances (σ^2) par les CM selon le tableau 9, nous obtenons : $\sigma_g^2 = (CM_g - CM_e) / r$ (Gallais, 1990).

La variance phénotypique σ_p^2 devient alors:

$$\sigma_p^2 = (CM_g + (r-1) CM_e) / r; \text{ et}$$

en fonction des carrés moyens (CM), l'héritabilité s'écrit:

$$H = (CM_g - CM_e) / (CM_g + (r-1) CM_e)$$

avec: r: nombre de répétitions; CM_g : carré moyen génotypique; et CM_e : carré moyen résiduel.

La réponse à la sélection (ΔG) de la génération F4 a été obtenue à partir de l'équation : $\Delta G = iH\sigma_p$ (Gallais, 1990)

avec: i: intensité de la sélection; et σ_p : écart type phénotypique.

L'intensité de sélection met en évidence les meilleurs individus dans les meilleures familles (Moreno Gonzalez et Cubero, 1993) et elle représente l'effet de la sélection inter- et intra-familiale (Falconer, 1981). La valeur σ_p représente l'écart type phénotypique spécifique à la génération F4.

3. 4. 2. Détermination des paramètres agronomiques d'évaluation de la génération de sulla F4

Les paramètres d'évaluation de la génération F4 ont été déterminés comme suit:

- la biomasse sèche hivernale au mois de janvier 1997 (BSH); et
- la biomasse sèche printanière à la floraison au mois d'avril 1997 (BSP).

On a coupé l'équivalent de 2,5 m de long sur les 2 lignes de chaque répétition. La technique de détermination est décrite dans 3. 3. 2. 1..

- la hauteur de végétation en hiver (HVH): ce paramètre représente un bon indicateur (Prosperi et Genier, 1996) de la vigueur des plantes en hiver. Sur chaque ligne on mesure la hauteur en cm des plantes par un herbomètre artisanal gradué en cm.

- la longueur de la tige principale à la floraison (LTF): cette mesure a été faite juste avant la coupe printanière (mois d'avril). Pour cela, une plante de chaque ligne a été prélevée au hasard. La longueur de la tige principale représente la distance entre le collet et l'inflorescence terminale.

- la surface foliaire printanière à la floraison (SFP) a été mesurée sur les mêmes échantillons qui ont servi à la détermination de la longueur de la tige principale selon la méthode décrite dans 3. 3. 1. 2..

- le rapport de poids des feuilles sur les tiges au printemps (FTP): ce rapport a été obtenu toujours sur les mêmes plantes au stade floraison, après avoir séparé les feuilles des tiges selon la méthode citée dans 3. 3. 2. 2..

- les protéines brutes (PB): après broyage de l'échantillon sec qui avait servi à la détermination du taux de matière sèche du fourrage, on a prélevé 5 g de poudre végétale est mis dans une étuve à 105°C durant 24 h, pour déterminer d'abord la matière sèche analytique (AFNOR,1983). La détermination de l'azote total (%N) est faite par la méthode Kjeldahl adaptée à l'auto-analyser de marque Technicon (Ben Jeddi *et al.*, 1989). Elle nous a permis de déduire la matière azotée totale ou protéines brutes après multiplication de %N par le facteur 6,25. Cette valeur est exprimée en pourcentage de la matière sèche.

- la digestibilité de la matière organique (DMO): la méthode digestibilité *in sacco* a été utilisée dans cet essai (Orskov *et al.*, 1980). Les animaux sont des vaches de race Pie noire Holsteinisée (croisement entre la pie noire hollandaise et la Holstein américaine) nées en Tunisie ayant un poids moyen de 600 kg. Ces animaux sont munis de canules au rumen de 15 cm de diamètre.

Les échantillons de 2 g à incuber dans le rumen ont été introduits dans des sachets fabriqués en toile de nylon ayant une porosité de 50 μm et de dimensions (Lxl = 9x6,5 cm). Une fois remplis, les sachets ont été fermés par des colliers de serrage en plastique puis fixés sur des tiges en caoutchouc et incubés dans le rumen.

Après 48 h, les tiges ont été retirées, les sachets ont été rincés en premier lieu sous un jet d'eau; ensuite, ils ont été soumis à un lavage dans une machine à pulsateur de marque Philips pendant 3 fois 5 minutes. Une fois essorés, les sachets ont été séchés dans une étuve ventilée à 60°C de marque Jouan jusqu'au poids constant. La différence de poids de l'échantillon avant incubation dans le rumen et après nous a donné la matière sèche digestible du fourrage. Le taux de digestibilité représente le rapport entre le poids de l'échantillon après incubation dans le rumen et le poids initial.

Le contenu des sachets a été mis ensuite dans un four tubulaire de marque Thermolyne à 550°C, pendant 12 heures. La différence de poids de l'échantillon avant incinération et après, permet d'obtenir le poids de matière organique de l'échantillon. Ce dernier est multiplié par le taux de digestibilité pour donner la matière organique digestible.

- La cellulose brute (CB): l'analyse de la cellulose brute du fourrage a été déterminée selon la méthode de Weende décrite par GAFTA, (1995). Les échantillons en poudre végétale sèche de 2,7 à 3 g ont été délipidés et traités successivement avec des solutions bouillantes d'acide sulfurique à 0,255N et de soude à 0,513N. Les résidus ont été séparés par filtration, lavés, séchés et réduits en cendre dans un four tubulaire de marque Thermolyne à 550°C. La perte de poids qui en résulte correspond à la quantité de cellulose brute présente dans les prises d'essai.

4. REPONSE DES GENOTYPES SELECTIONNES DE *Hedysarum coronarium* L. AUX VARIATIONS DU MILIEU

4.1. Effets des stress salin et hydrique sur le pouvoir germinatif des sillas sélectionnés

En Tunisie, La situation climatique automnale favorable à la germination des espèces fourragères est souvent imprévisible. Les tests de germination des génotypes dans des conditions différentes sont impliqués directement dans la sélection pour leur adaptation à ces milieux (Floret et Pontanier, 1982). De plus, Waisel (1972) a montré que la réponse des graines est un bon indicateur de la tolérance de la plante aux stress comme le sel (NaCl) pour les stades de développement ultérieurs. Dans le présent essai, 6 génotypes parmi 17 ont fait l'objet de cette étude qui intéresse leur comportement germinatif dans des conditions de stress salin et hydrique. Il s'agit de S1L10; S4L4; S7L7; S9L1; S10L4; et S14L6 (tableaux annexe, III a, III b, IV a, IV b). Ce choix a été fait selon leur classification dans la sélection et la quantité de semences disponibles pour les essais suivants. A chaque fois, ces génotypes ont été comparés à un témoin qui est le sulla Sgaravatti.

4. 1. 1. La sécheresse simulée

Les stress hydriques ont été simulés par des solutions de polyéthylène glycol (PEG 6000) à des concentrations croissantes. Le PEG, de poids moléculaire élevé (20 000) bien que ne traversant pas la membrane cellulaire (McWilliam *et al.*, 1970) peut être toxique s'il est utilisé sous la forme commerciale et ce à cause des impuretés. Dans ce cas, le PEG 6000 en tant qu'agent osmotique est relativement stable, bien soluble dans l'eau et non toxique (Jackson, 1962; Potter *et al.*, 1986; Boydson, 1989).

Les concentrations en PEG simulant les différents niveaux de potentiel hydrique testés ont été calculées sur la base de l'équation formulée par Michel et Kaufmann (1973).

Les quantités de PEG relatives aux différentes pressions osmotiques sont les suivantes:

- témoin: 0 g/litre
- -1 bar: 72,49 g/l;
- -3 bars: 143,20 g/l; et
- -7 bars: 232,99 g/l.

Les dilutions de PEG ont été faites dans l'eau distillée.

Les semences utilisées ont été récoltées avant 5 mois. Pour chaque traitement, on a placé 100 graines de sulla dans une boîte de pétri de 12 cm de diamètre avec papier filtre de marque pb Papelera del Besos. Le dispositif expérimental est complètement randomisé avec 4 répétitions. La germination a été faite dans une étuve réfrigérée de marque Kottermann, à une température de 20°C et à l'obscurité. La durée d'incubation a été de 15 jours. Tous les trois jours, on a ajouté l'équivalent de 3 ml de solution de PEG afin de maintenir un niveau d'humidité constant dans toutes les boîtes. Le comptage des graines germées a été fait tous les jours.

4. 1. 2. La salinité

Les sols halomorphes représentent en Tunisie une part non négligeable de la surface totale (Belkhoja *et al.*, 1973). La germination est un facteur majeur limitant l'installation des cultures sensibles dans les conditions de salinité (Rehman *et al.*, 1997). De ce fait, le test de germination des sallas sélectionnés au stress salin peut être une étape parmi d'autres permettant leur caractérisation agronomique.

Différentes quantités de sel (NaCl) ont été diluées dans l'eau distillée afin d'obtenir les concentrations suivantes: 2, 4, 6 et 8 g/l. Ces traitements ont été comparés à un témoin avec 0 g/l de sel. Les semences utilisées sont issues du même lot que pour l'essai stress hydrique. Le protocole expérimental suivi est identique au précédent.

En plus des facultés germinatives des sillas dans divers stress hydrique et salin, nous avons déterminé d'autres paramètres utiles comme les DG_{50} et DL_{50} . D'après Rehman *et al.*, (1997), le DL_{50} représente le niveau de stress qui inhibe 50 % de la faculté germinative totale, alors que le DG_{50} entraîne un taux de germination égale à 50 % indépendamment de la germination finale du génotype.

4. 2. Effet d'une variation de milieu sur le potentiel agro-fourragier des sillas sélectionnés

Plusieurs échecs ont été constatés lors de l'introduction de nouvelles variétés dans des milieux autres que leur origine. De ce fait, les essais multiloceaux vont jouer un rôle important dans l'évaluation de génotypes nouvellement mis au point. Ces essais permettent entre autres d'évaluer leurs comportement et productivité dans des milieux pédo-climatiquement différents et de sélectionner les mieux adaptés. Quoique le silla *Hedysarum coronarium* L. est une espèce qui convient à la Tunisie semi-aride et humide, les tests d'évaluation des sillas sélectionnés dans ces milieux ne peut qu'apporter un plus de renseignements très utiles pour leur utilisation future dans les systèmes de culture.

4. 2. 1. Installation de l'essai

Deux sites expérimentaux ont été choisis dans cet essai. Il s'agit de Tunis-INAT (semi-aride) et Mateur (sub-humide). Le dispositif expérimental a été le bloc complètement aléatoire. Il comporte 3 blocs (3 répétitions), dans lesquels les 6 génotypes sélectionnés (S1L10; S4L4; S7L7; S9L1; S10L4; et S14L6) ont été distribués d'une manière aléatoire en comparaison avec Sgaravatti. Cette distribution aléatoire est très utile pour la suite de l'essai afin de ne pas favoriser un génotype quelconque dans une parcelle bien déterminée. Les facteurs à analyser sont les génotypes (facteur principal), la coupe (facteur 2) et le site (facteur 3). Chaque bloc comporte sept unités expérimentales de 24 m² chacune et ayant 10 lignes espacées de 0,4 m.

Les semis ont été réalisés le 22 octobre 1996, après un labour superficiel du sol à 20 cm de profondeur par un mini-tracteur de marque Kubota et un épandage d'une fumure de fond de 80 kg de P₂O₅ et 50 kg de K₂O. Selon la faculté germinative du génotype établies par des tests de germination à 20°C et à l'obscurité, les doses de semis en gousses ont varié de 3 à 6 g/m². Le semis a été réalisé manuellement en faisant répartir la quantité de semences uniformément sur toute la ligne.

La première année d'installation de l'essai (1996-97) était une année relativement sèche. De ce fait, nous avons apporté deux irrigations de complément tout au long du cycle de développement des cultures. La première irrigation de 25 mm a été faite juste après les semis (25-26 octobre 1996) afin d'assurer une levée correcte et la deuxième de 30 mm a été apporté vers le 15 mars. Ces doses d'irrigations ont été calculées en fonction du déficit pluviométrique (quantité de pluies-évapotranspiration potentielle) enregistré par rapport à une année normale.

En deuxième année de culture (1997-98), les pluies saisonnières étaient suffisantes pour suivre normalement les cultures dans les deux sites expérimentaux. Les hauteurs de pluies enregistrées entre la levée (septembre) et la dernière coupe (mai) étaient de 380 et 520 mm respectivement pour Tunis et Mateur.

4. 2. 2. Description des opérations de coupes

La première année, une seule coupe était réalisé au stade floral. A Tunis, les stades de floraison étaient plus précoces vu les températures qui sont plus clémentes. La culture était laissée par la suite en estivation (dormance estivale) pour reprendre juste après les premières pluies automnales. Le redémarrage des plantes au cours de la 2^{ème} année était meilleur à Mateur vu une meilleure pluviométrie du mois de septembre. Au cours de la deuxième année, le nombre de coupes réalisées était donc au nombre de 3 dans le site de Tunis et 4 à Mateur (tableau, 10).

En deuxième année de culture, les géotypes ont été coupés lorsqu'ils ont atteint une hauteur comprise entre 40 et 50 cm. Ces coupes ont été réalisées manuellement par une faucille à un niveau de 5 cm du sol.

Tableau 10: Dates de coupe des sillas dans les sites expérimentaux

	Site de Tunis-INAT	Site de Mateur
année 1	22 mars	30 mars
année 2		
coupe 1	15 décembre	03 novembre
coupe 2	02 mars	13 janvier
coupe 3	30 avril	20 février
coupe 4	-	04 mai

4. 2. 3. Les paramètres d'étude

4. 2. 3. 1. La biomasse sèche

Les rendements en matière sèche des 1^{ère} et 2^{ème} année ont été obtenus après la coupe d'une surface de 9 m² par géotype et élimination des lignes périphériques. La biomasse obtenue représente la production fourragère verte. De cette masse, un échantillon de 500 g en moyenne a été prélevé au hasard. Cet échantillon est formé par des plantes entières. Les plantes complètes ont été ensuite pliées en 2 ou 3 selon la hauteur et mises dans des sachets troués en papier Kraft. Le séchage a été fait dans une étuve ventilée de marque Jouan à 80°C jusqu'à stabilisation du poids. Le rapport des poids frais avec les poids secs des échantillons a donné les taux de matière sèche. Ces taux ont été multipliés par les poids frais pour déterminer la biomasse sèche.

4. 2. 3. 2. Estimation de la stabilité génotypique

La stabilité génotypique est liée à l’adaptation d’un tel génotype à un milieu donné. Plusieurs auteurs, en particulier Finlay et Wilkinson (1963) et Ebelhart et Russel (1966) ont montré que la corrélation entre la performance (exprimée en productivité) des génotypes et les environnements variés est souvent linéaire. De ce fait, ils ont décrit et élaboré des méthodes de régression pour caractériser les réponses génotypiques à des conditions d’environnements différents. Plusieurs paramètres statistiques sont utilisés pour présenter cette stabilité. Vu que le nombre de sites testés dans cette étude se trouve limité à 2, cette méthode ne peut pas être appliquée. Par contre, d’autres méthodes d’évaluation comme celle de Wiricke, (1962) qui a élaboré un paramètre appelé écovalence. Ce dernier peut être utilisée sans contrainte (Mansour, 1997).

Tableau 11 Modèle de répartition des moyennes génotypiques selon l’environnement de l’essai
 Y_{ij} : moyenne de la variété i dans l’environnement j ;
 $Y_{i.}$: moyenne de la variété i à travers les environnements;
 $Y_{.j}$: moyenne de l’environnement j à travers les génotypes;
 $Y_{..}$: moyenne générale;
 p : nombre de génotypes; et
 q : nombre d’environnements.

Génotype i	environnement j			moyenne y_i
	1	2	q	
1	Y_{11}		Y_{1q}	$Y_{1.}$
2	Y_{21}		Y_{2q}	$Y_{2.}$
p	Y_{p1}		Y_{pq}	$Y_{p.}$
Moyenne $y_{.j}$	$Y_{.1}$		$Y_{.q}$	$Y_{..}$

A partir du tableau 11, on a déterminé l’écovalence W^2_i de chaque génotype i :

$$W^2_i: \sum (Y_{ij} - Y_{i.} - Y_{.j} + Y_{..})^2 \text{ (WIRICKE, 1962).}$$

Selon cette méthode, le génotype le plus stable est celui qui un W^2_i le plus faible. Dans ce cas, les productions du génotype varient peu d’un site à l’autre. En plus la moyenne générale de tous les sites ne se trouve pas très différente de la moyenne dans un site donné.

4. 2. 3. 3. Les protéines brutes

La détermination des protéines brutes a été faite selon la même méthode décrite dans 3. 4. 2..

4. 2. 3. 4. L'unité fourragère lait

L'évaluation de l'énergie produite par les différentes cultures fait appel aux Unités Fourragères Lait (UFL). Le système des UFL, fait intervenir le paramètre énergie métabolisable (Em).

L'équation de détermination de la valeur énergétique (UFL) est:

$$UFL = (Em \times KI) / 1,73 \quad (\text{INRA, 1980})$$

avec: Em: énergie métabolisable;
KI = 0,6 + 0,24 (q - 0,57);
q = Em / Eb; et
Eb: énergie brute.

L'énergie métabolisable (Em) a été calculée comme suit:

$$Em = 3,4 \text{ MOD} + 1,4 \text{ PBD} \quad (\text{INRA, 1980})$$

avec: MOD: matière organique digestible; et
PBD: protéines brutes digestibles.

Les protéines brutes ainsi que les digestibilités du fourrage ont été déterminées selon les méthodes décrites dans 3. 4. 2..

L'énergie brute (Eb) a été déterminée en KJ/kg de matière sèche, après avoir passer les échantillons sous forme de poudre au calorimètre adiabatique de marque IKA C7000 permettant de doser le pouvoir calorifique de l'échantillon après combustion. Le nombre d'unités fourragères est exprimé par kg de matière sèche. Les rendements obtenus pour les différents génotypes dans les deux sites et au cours des deux années de culture ont permis de calculer leur production exprimée en UFL/ha après multiplication de la biomasse sèche par la valeur UFL spécifique.

5. ETUDE DES ARRIERES-EFFETS DE *Hedysarum coronarium* L. DANS LES SYSTEMES DE ROTATION

5. 1. Caractéristiques agronomiques du matériel biologique utilisé

5. 1. 1. Présentation des espèces

Les espèces utilisées dans cette expérimentation ont été multipliées et maintenues par le Laboratoire de Productions Fourragère et Pastorale de l'INA Tunisie. Il s'agit de blé dur (*Triticum durum* Desf.); sulla du nord (*Hedysarum coronarium* L.); féverole (*Vicia faba* L., var. *minuta* (Hort. ex Alef.) Mansf.) et colza fourrager (*Brassica napus* L.).

Tableau 12 Spécificités générales du matériel biologique utilisé dans les systèmes de rotation

PMG: poids de mille grain (es); FG: faculté germinative

Espèce	nom commun	variété	identifiant INA Tunisie	origine	PMG (g)	FG 20°C (%)
<i>Hedysarum coronarium</i> L.	sulla du nord	Sgaravatti	90 033 07	Italie	5,45	65
<i>Vicia faba</i> L. var. <i>minuta</i> (Hort. ex Alef.) Mansf.	féverole	population locale	89 136 00	Tunisie	524,59	100
<i>Brassica napus</i> L.	colza	Vélox fourrager	90 018 07	Hollande	2,93	97
<i>Triticum durum</i> Desf.	blé dur	Karim	90 133 01	Mexique	37,03	94

5. 1. 2. Cycle biologique des espèces cultivées

Le suivi des cycles biologiques des espèces durant la décennie 1990-1999, a bien montré l'avantage d'introduire des cultures fourragères dans un système de rotation diversifié. Même en condition de printemps relativement sec, la production de fourrage à partir du colza a été assurée tôt après 90 à 120 jours du semis (tableau 13). De même, le sulla fourrage est considéré comme une espèce relativement précoce puisqu'elle peut être exploitée en 1^{ère} année par l'agriculteur à partir du stade bouton floral (120 jours après le semis). Cette production précoce rend le système de culture souple surtout dans les conditions pluviales.

Quant à la production de semences, elle demeure beaucoup plus dépendante des pluies saisonnières. Avec la variété Karim de blé dur, les grains ne deviennent mûres qu'après 230 jours du semis. Pour cela les pluies printanières sont décisives.

Dans les mêmes conditions, les semences de sulla, féverole et colza exigent une durée de maturité plus courte que celle du blé dur.

Tableau 13 Durée en jours après semis des principaux stades agrobiologiques des variétés utilisées

Stades	blé dur	sulla	féverole	colza
3 feuilles	30	50	20	25
8 feuilles	-	-	-	75
Ramification/tallage	45	100	80	-
Montaison	85	-	-	90
Epiaison	120	-	-	-
Bouton floral	-	120	110	120
Pleine floraison	145	135	125	135
Grain(s) pâteux	175	170	150	160
Grain(s) mûres	230	200	190	180

5. 2. Présentation générale du dispositif expérimental de l'essai

L'essai spécifique obéit aux principes d'un système d'assolement et de rotation des cultures longue durée visant la mise au point d'un système de culture durable en équilibre avec l'environnement (Foster, 1991). Une des questions principales posée concerne les effets d'une succession culturale sur la productivité et la fertilité du sol.

Le précédent cultural était une collection de ray-grass annuel (*Lolium multiflorum* Lam.). Les systèmes de rotation mis au point sont présentés au tableau 14.

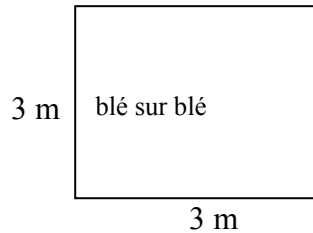
Tableau 14 Présentation des systèmes de rotation entre 1990 et 1999
SR: système de rotation; B: blé dur; J: jachère; S: sulla; C: colza et F: féverole

SR.	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
SR1	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
SR2	J	B	J	B	J	B	J	B	J	B
SR3	S	S	B	B	S	S	B	B	S	S
SR4	S	S	B	C	S	S	B	C	S	S
SR5	S	S	B	F	S	S	B	F	S	S

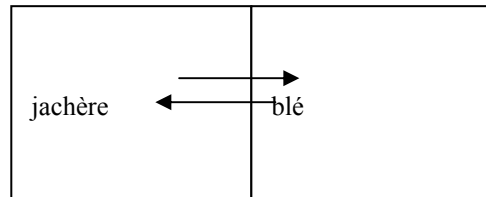
Ces systèmes ont été incorporés dans un dispositif expérimental en BAC (bloc aléatoire complètement randomisé) avec trois répétitions à Tunis-INAT.

Chaque répétition comportait 5 systèmes de rotation (SR1, SR2, SR3, SR4 et SR5) ayant chacun un nombre variable d'unités expérimentales selon le système de rotation en question (figure 18). Le nombre total par bloc de ces unités est de 15. La surface totale de l'unité expérimentale est identique pour tous les systèmes soit 9 m².

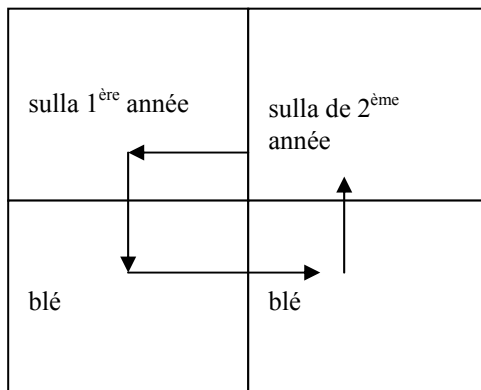
- SR1: système de monoculture de blé



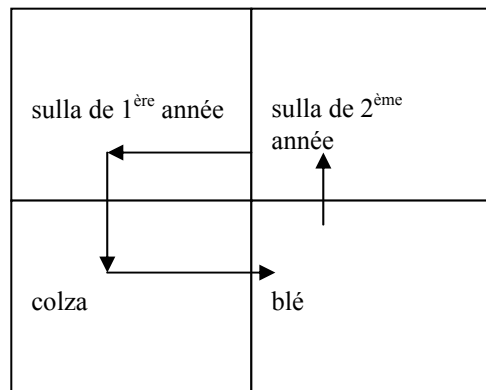
- SR2: système de rotation jachère/blé:



- SR3: système de rotation SSBB:



- SR4: système de rotation SSBC:



- SR 5: système de rotation SSBF:

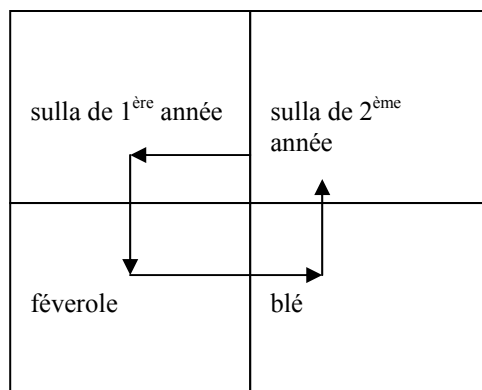


Figure 18 Présentation schématique des unités expérimentales de chaque système de rotation
S: sulla; B: blé dur ; F: féverole ; C: colza fourrage

5. 3. Installation des systèmes de rotation

5. 3. 1. Préparation des soles

Le travail du sol qui précède les semis de chaque année comporte un labour moyen de 20 à 30 cm de profondeur suivi d'un ou deux recroisements selon l'humidité du sol et la présence ou non de grosses mottes. La préparation du lit de semences a été faite par un passage de rotavator . Pour ces travaux, nous avons utilisé un mini-tracteur de marque Kubota.

Les apports en éléments fertilisants ont été calculés en fonction des exportations de chaque culture en azote, phosphore et potassium (tableau, 15), et la richesse du sol en ces éléments. Les analyses du sol étaient faites périodiquement avant chaque semis de l'année et au niveau de chaque rotation selon les techniques décrites ci-dessous au 5. 4.. La fumure de fond composée de P₂O₅ et de K₂O était toujours incorporée au sol avant le dernier recroisement.

Tableau 15 Exportation des éléments majeurs N-P-K par tonne de matière produite (matière sèche fourragère, semences, pailles et fanes) par les différentes cultures (Baccouche, 1998)

Espèce	kg/tonne		
	Azote	Phosphore	Potassium
<i>Hedysarum coronarium</i> L.	25,0	18,7	25,0
<i>Vicia faba</i> L. var. <i>minuta</i> (Hort. ex Alef.) Mansf.	22,9	6,6	31,8
<i>Brassica napus</i> L.	20,8	13,5	17,0
<i>Triticum durum</i> Desf.	12,5	8,0	12,0

Le sulla exporte autant d'azote que de potassium (Baccouche, 1998). Cette demande importante de potassium par le sulla explique son bon comportement sur des sols marneux riches en cet élément (Semadeni, 1976).

L'azote d'origine symbiotique du sulla et de la féverole représente au moins 90 % de leur besoin azoté total (Tibaoui, 1986; Ben Jeddi *et al.*, 1989). L'inoculation des semences de sulla et féverole par leur *Rhizobium* spécifique respectivement *Rhizobium sullae* Squartini *et al.*, 2000, sp. nov. et *Rhizobium leguminosarum* (Frank 1879) Frank 1889 n'a pas été jugé nécessaire vu que les sols de l'INAT ont souvent porté des fabacées.

Concernant la fertilisation azotée, le but est de veiller à ce qu'il y'ait une bonne gestion de ce fertilisant. Au cours de la première année (1990), tous les blés en SR1, SR2, SR3, SR4 et SR5 ainsi que le colza en SR5 ont reçu la même quantité d'azote (120 kg/ha). Par la suite, ces doses ont plus ou moins évolué selon les teneurs d'azote analysées dans le sol avant chaque semis.

5. 3. 2. Semis des cultures

Selon les conditions climatiques de l'année, les semis étaient réalisés manuellement entre le 10 et 30 octobre pour le sulla, la féverole et le colza, alors que le blé dur était installé entre le 20 octobre et le 10 novembre. Les densités de peuplement par unité de surface étaient déterminées selon le pouvoir germinatif du lot de semences (tableau, 16).

Tableau 16 Densités de semis des cultures dans les différentes soles

culture	plantes/m ²	nombre de lignes/sole	distance entre les lignes (cm)
<i>Hedysarum coronarium</i> L.	150-170	6	0,5
<i>Vicia faba</i> L. var. <i>minuta</i> (Hort. ex Alef.) Mansf.	15-20	6	0,5
<i>Brassica napus</i> L.	80-100	6	0,5
<i>Triticum durum</i> Desf.	300-320	15	0,2

Selon la répartition des pluies mensuelles au cours de l'année, des irrigations de complément ont été prévues pour combler le déficit hydrique calculé selon la différence entre les pluies et l'évapotranspiration potentielle. En général, la moyenne des quantités d'eau (pluies et irrigation) que nécessitaient les diverses cultures fourragères (sulla, colza et féverole) n'ont pas dépassé le total de 400 mm entre septembre et mai. Quant au blé, il a nécessité entre 500 et 550 mm d'eau depuis le semis jusqu'à la récolte (tableau 17).

Tableau 17 Estimation des quantités d'eau nécessitées (pluie et irrigation) par les différentes cultures entre le semis et la récolte

Cultures	Quantité d'eau consommée en mm (pluie + irrigation) moyenne annuelle de la décennie 1990-1999
<i>Hedysarum coronarium</i> L.	330
<i>Vicia faba</i> L. var. <i>minuta</i> (Hort. ex Alef.) Mansf.	450
<i>Brassica napus</i> L.	350
<i>Triticum durum</i> Desf.	520

Aucun traitement phytosanitaire n'a été fait. Le désherbage a été réalisé mécaniquement à raison de 2 passages/an.

5. 3. 3. Exploitation des cultures

L'exploitation des cultures servant aux diverses observations et mesures était réalisée selon le modèle du tableau 18.

Tableau 18: Calendrier d'exploitation des différentes cultures durant la décennie 1990-1999
HV: hauteur des plantes; DF: début floraison; F: floraison (50 %); GM: grain(es) mûres

Cultures	semis	production	stade	période	semis-récolte (j)
sulla:	10-30/10				
année1		fourrage vert	DF-F	15-30/3	135-170
année2		fourrage vert:			
		- coupe1	HV: 30-40 cm	25/12-10/1	65-90
		- coupe2	DF-F	1-15/4	150-185
féverole	10-30/10	graines	GM	15-30/5	95-230
colza	10-30/10	fourrage vert	DF-F	20-25/3	145-165
blé dur	20/10-10/11	grains	GM	15-30/6	215-250

Les intervalles de temps nécessaire au déroulement de activités de semis et de récolte des cultures ont été largement influencés par les conditions climatiques durant la décennie 1990-1999.

5. 4. Paramètres mesurés durant l'essai

Les observations et les prélèvements réalisés durant toute la période de l'étude ont intéressé aussi bien le milieu sol que la plante. Ces deux déterminent entre autres la rentabilité des systèmes de rotation testés.

5. 4. 1. Résidus secs aériens et racinaires incorporés au sol

Avant le labour de chaque sole avec une charrue à disques, deux lignes des parcelles de colza, sulla et féverole et 5 lignes de la parcelle de blé dur étaient réservées à l'estimation de la quantité de résidus retournés au sol (parties aérienne et racinaire). Sur ces lignes, un mètre linéaire du milieu de la sole a fait l'objet d'un prélèvement de la partie racinaire jusqu'à une profondeur de 0,6 m. Sur cette ligne, on a aussi évalué la partie aérienne composée de chaumes et fanes.

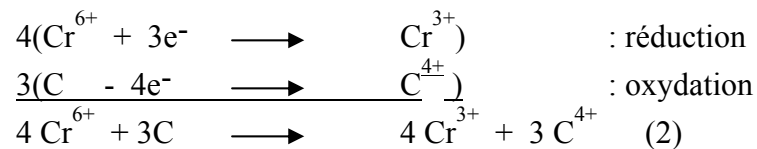
Toute la masse prélevée (parties aérienne et racinaire séparément) a été pesée immédiatement avec une balance monoplateau de marque Mettler (+/-1 g). Trois échantillons de cette masse étaient pris au hasard à fin de servir à la détermination de la matière sèche. Ces résidus étaient ensuite incorporés au sol au cours du labour par une charrue à disques tirée par un mini-tracteur de marque Kubota.

5. 4. 2. La matière organique du sol

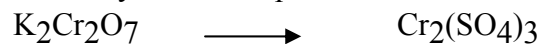
Le dosage de la matière organique a été réalisé à partir du dosage de l'un de ses constituants qui est le carbone (Cottenie *et al.*, 1979). En admettant que la matière organique contient en moyenne 58 % de carbone, il est possible de calculer son taux dans tous les sols à partir du C organique. Pratiquement le pourcentage de matière organique est donné par la relation :

$$\% \text{ M.O.} = 1,725 \times \% \text{ C} \quad (1) \quad (\text{AFNOR, 1983}).$$

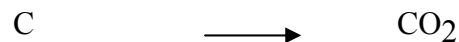
La méthode de détermination du % de C organique est basée sur l'oxydation de ce dernier par le bichromate de potassium $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ en milieu fortement acide (acide sulfurique). Le C est transformé en CO_2 et $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ est réduit en Cr^{3+} . Le mécanisme réactionnel est illustré par les équations suivantes :



Cette réaction ayant lieu en présence d'acide sulfurique, on a :



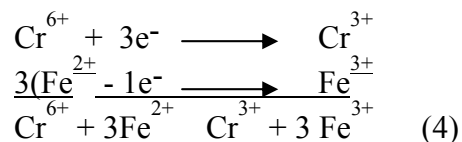
par ailleurs :



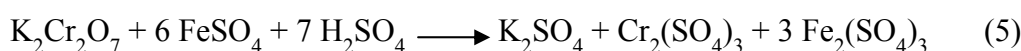
La réaction globale s'écrit :



La quantité de $K_2Cr_2O_7$ utilisée excède la quantité nécessaire pour l'oxydation du C de la matière organique à doser. L'excès de $K_2Cr_2O_7$ est titré à l'aide d'une solution de sulfate ferreux ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$) :



Comme la titration se fait en présence de H_2SO_4 on a :

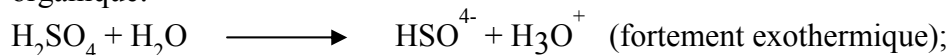


Le point d'équivalence est indiqué par le virage de la diphénylamine (indicateur d'oxydoréduction) du violet au vert. Pour rendre la fin de la réaction plus sensible, on ajoute de l'acide phosphorique qui complexe Fe^{3+} et diminue de ce fait le potentiel redox du système Fe^{3+}/Fe^{2+} .

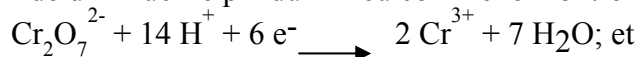
Il est à remarquer que :

- L'utilisation de l'acide sulfurique a pour but :

- de créer une réaction exothermique favorisant l'oxydation de la matière organique :

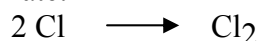


- de diminuer le pH du milieu comme le montre la réaction suivante :



- plus le pH est bas, plus le pouvoir oxydant est grand.

- Cette méthode suppose l'absence dans le sol de tout réducteur de $K_2Cr_2O_7$ en dehors du C organique. C'est ainsi que le chlore réduit quantitativement le bichromate :



Pour les sols contenant des chlorures il y a lieu de corriger le pourcentage de carbone trouvé ou d'éliminer son effet en utilisant du sulfate d'argent pour le précipiter.

- La réaction d'oxydation du C organique par le bichromate n'est pas complète, mais la proportion du carbone oxydé est sensiblement constante en général 75 %, ce qui permet d'utiliser un facteur de correction.

Les réactions (2) et (3) montrent en outre que chaque équivalent de $K_2Cr_2O_7$ doit théoriquement oxyder 1 équivalent de C. En réalité, en se basant sur le taux d'oxydation de 75 %, 1ml de la solution du bichromate ou 1 méq de ce composé correspond à $3 \text{ mg} \times 100/75 = 4 \text{ mg}$ de carbone organique du sol.

Les variations des quantités de matière organique après chaque culture étaient évaluées suite à des prélèvements fréquentiels du sol à l'aide d'une tarière au début et en fin de chaque culture. L'échantillonnage était fait à différents horizons (0-20), (20-40) et (40-60cm) de profondeur. Selon Rémy et Marin-Laflèche (1974), la quantité de matière organique dans le sol (MO) est calculée comme suit:

$$MO(t/ha) = p \times da \times s \times MO_t \quad (6)$$

avec: p: profondeur du sol prospectée, en m;
da: densité du sol apparente;
s: surface des parcelles en ha; et
MO_t: taux de matière organique du sol à l'instant t.

Cette quantité de matière organique (MO) subit la minéralisation dont l'intensité varie en fonction de la nature du sol, la température et l'humidité. La matière minéralisée ou matière humique se trouve sous forme relativement stable.

5. 4. 3. La matière humique

L'humification de la matière organique dépend de la quantité des résidus organiques restitués au sol, mais aussi d'un coefficient relatif à la nature des résidus appelé coefficient iso-humique (K_i) (Lubet et Juste, 1979; Delas et Molot, 1983).

En 1990, Sebillote, proposa une équation formulant la variation des teneurs en matière organique humifiée en fonction des coefficients iso-humiques des cultures:

$$MH_n = (1/K) (1 - e^{-K}) [\sum K_{1i} A_i e^{-(n-1)/K}] + MH_0 e^{-nK}, \quad (7)$$

avec: MH_n : quantité de matière humique issue de culture n, en t/ha;
 A_{1i} : restitution de la $i^{\text{ème}}$ année en t/ha;
 K_{1i} : coefficient iso-humique des restitutions A_i ;
K: coefficient de minéralisation; et
 MH_0 : matière humique initiale.

Le coefficient de minéralisation K (Rémy et Marin-Laflèche, 1974) varie selon les teneurs du sol en argile et en calcaire:

$$K = 1200 / (A + 1200) \times (Ca + 200). \quad (8)$$

La matière humique (MH_n) peut aussi être calculée selon la formule suivante de Rémy et Marin-Laflèche, (1974):

$$MH_n \text{ (t/ha)} = K \times MO \quad (9)$$

avec: MH_n: matière humique de la culture n en t/ha;
K: Coefficient de minéralisation (4);
A: teneur du sol en argile en % (N'cib, 1991);
Ca: teneur du sol en calcaire total en % (N'cib, 1991); et
MO: quantité de matière organique.

Les coefficients iso-humiques de chaque culture ont été déterminés après avoir restitué tous les résidus et analysé le taux de matière organique dans chaque sole. Le calcul de ces coefficients (K_i) est déduit à partir de l'équation (7), après avoir calculé le coefficient K (8) et la quantité de matière humique MH (9).

Tableau 19 Coefficients iso-humiques moyens (1990-1999) relatifs aux cultures pratiquées

Espèce	racines	chaumes	fanés
<i>Hedysarum coronarium</i> L.	0,20 +/- 0,01	-	0,13 +/- 0,04
<i>Vicia faba</i> L. var. <i>minuta</i> (Hort. ex Alef.) Mansf.	0,16 +/- 0,01	-	0,10 +/- 0,02
<i>Brassica napus</i> L.	0,15 +/- 0,02	-	0,12 +/- 0,01
<i>Triticum durum</i> Desf.	0,15 +/- 0,01	0,08 +/- 0,02	-

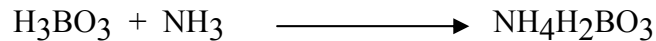
5. 4. 4. Les résidus azotés

5. 4. 4. 1. L'azote organique

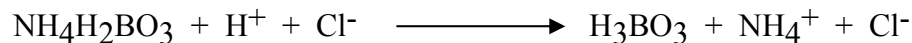
L'analyse des différentes formes de l'azote (organique et minérale) était faite sur une partie des échantillons du sol qui avait servi au dosage de la matière organique.

La méthode Kjeldahl a été utilisée pour analyser l'azote organique dans le sol (Bremner, 1965). Elle se base sur le principe de minéralisation de l'azote organique par l'acide sulfurique en présence d'un catalyseur composé de sulfate de potassium 1 N et d'oxyde de mercure. Cette minéralisation fait apparaître l'azote ammoniacal. Après distillation, l'azote a été récupéré dans une solution d'acide borique.

L'acide borique capture le NH_3 suivant la réaction :



La solution obtenue est titrée ensuite avec de l'acide chlorhydrique 0,01 N. Ce dernier réagit avec le borate d'ammonium en donnant du chlorure d'ammonium et de l'acide borique non dissocié H_3BO_3 :



Cette réaction est achevée à pH 5. Le virage de l'indicateur choisi s'effectue à cette valeur du pH.

5. 4. 4. 2. L'azote minéral

Afin d'éviter toute perte d'azote sous forme ammoniacale (NH_3), les échantillons de sol utilisés pour l'analyse de l'azote minéral doivent être humides. Pour cela, on les a conservés à -18°C durant la période qui s'est écoulée entre le prélèvement sur le terrain et le démarrage des analyses. Cet azote est extrait par le chlorure de potassium 1 N après agitation de 2 heures. Les solutions obtenues ont été filtrées puis distillées en présence de MgO (Oxyde de magnésium). L'ammonium (NH_4^+) a été récupéré dans une solution d'acide borique. Enfin, cette solution a été titrée par l'acide chlorhydrique 0,01 N.

Sur le même échantillon qui avait servi à la détermination de l'ammonium NH_4^+ , on a ajouté de l'alliage Dewarda et recommencé la distillation pour récupérer les nitrates (NO_3^-). Le reste de l'analyse est identique à celui de l'azote sous forme d'ammonium (Keeney et Nelson, 1982).

La détermination des différentes formes azotées a été faite trois fois par an :

- avant les semis (septembre), afin de connaître la réserve azotée dans le sol pour assurer une levée et installation correctes du couvert végétal;
- au mois de mars; c'est la période où la minéralisation de la matière organique est au maximum. De même, en ce moment de l'année, le besoin en azote des cultures est élevé. Donc, tout déficit azoté dans le sol aura des répercussions négatives sur les rendements; et
- en fin de chaque cycle cultural (juin), le résidu azoté dosé pendant cette phase de développement de culture permet de mettre au point un bilan azoté pour chaque culture dans la rotation (Sanaa, 1993).

L'évaluation de l'azote a été faite pour trois horizons du sol (0-20; 20-40 et 40-60cm).

5. 4. 5. Phosphore du sol

Le phosphore existe dans le sol sous deux formes principales:

- phosphore précipité: en sol calcaire les phosphates calciques constituent la majeure partie de cette forme; et
- phosphore des surfaces: adsorbé par les particules du sol.

La méthode d'extraction du phosphore accessible aux plantes couramment employée pour les sols calcaires est celle d'Olsen (Cottenie *et al.*, 1979). Le Phosphore est extrait au moyen d'une solution 0,5 M de bicarbonate de sodium à pH 8,5.

A ce pH, l'activité du calcium est suffisamment réduite, ce qui permet une solubilisation accrue du phosphore et évite certaines réactions secondaires telle que la reprécipitation de certains phosphates calciques. En outre les ions HCO_3^- du bicarbonate de sodium peuvent s'échanger avec les ions phosphoriques adsorbés d'où une meilleure simulation de l'action des racines.

La teneur en phosphore a été mesurée par l'analyse spectrométrique sur un appareil à flux continu de marque Technicon et à une longueur d'onde de 660 nm.

5. 4. 6. Potassium du sol

La méthode d'extraction du potassium comme décrite par Cottenie *et al.*, (1979) a été réalisée après avoir mis en contact l'échantillon de sol préalablement asséché à l'air libre, broyé et passé au tamis (< 2 mm) avec une solution d'acétate d'ammonium 1 M.

Après filtration et dilution, l'analyse a été faite par un spectromètre d'absorption atomique de marque AAS et à une longueur d'onde de 766 nm.

5. 4. 7. Rendements des cultures

Selon la vocation de la production de chaque culture on a:

- la matière première: elle est représentée soit par les semences (blé et féverole) soit par les fourrages (sulla et colza); et
- la matière secondaire: ce type de produit est destiné essentiellement à l'animal. Il se présente sous forme de paille de blé et fane de féverole.

L'estimation des rendements de ces produits a été effectuée sur les deux lignes médianes des parcelles de colza, sulla et féverole et les 5 lignes du milieu de la parcelle de blé soit une surface de 2 m² pour toutes les parcelles et après avoir déduit 0,5 m comme périphériques des lignes. Les lignes restantes n'interviennent pas dans l'estimation des rendements.

Les fourrages du sulla et du colza ont été fauchés et pesés immédiatement en plein champ. La matière sèche a été déterminée selon la méthode 4. 2. 3. 1.. Les rendements obtenus ont été convertis en t/ha.

Concernant la féverole et le blé, la récolte comprend deux produits sous forme de semences et paille ou fane. Après la récolte, le battage a permis de séparer les semences du reste de la plante. Le produit final est présenté en t/ha.

5. 4. 8. Azote exporté par les cultures

La quantité d'azote exportée par les différentes cultures a été mesurée selon la méthode décrite dans le paragraphe 3. 4. 2. L'azote fixé est déterminé en pourcentage de la matière sèche. Le produit du rendement sec en kg/ha avec les taux d'azote permet de déterminer la quantité d'azote en kg/ha pour les différents produits.

5. 4. 9. Energie produite par les cultures

L'énergie produite par les différentes cultures a été calculée en multipliant la quantité de matière sèche produite par son UFL correspondante (Unités Fourragères Lait). La méthode de détermination est décrite dans le paragraphe 4. 2. 3. 4.

5. 4. 10. Surface foliaire du blé

La surface foliaire du blé (cm²/plante) dans les diverses rotations a été réalisée pour les stades agronomiques suivants: levée (L), début tallage (DT), tallage (T), montaison (M), début épiaison (DE), épiaison (E) et grains pâteux (GP). Les mesures ont été faites sur 5 plantes x 3 répétitions en plein champs, par un planimètre portable selon 3. 3. 1. 2. Ces plantes sont issues des lignes médianes qui avaient servi à la détermination de la production du blé.

5. 4. 11. Productivité du blé

Au stade maturité des semences soit 230 jours après le semis, la récolte a été faite manuellement par des faucilles. La production de chaque rotation a été groupée en bottes. Chaque botte a été battue manuellement afin d'extraire les grains du reste (paille). Les pesées ont été effectuées par une balance monoplateau de marque Mettler (+/- 1g). Le rendement final en grains et en paille du blé dur a été exprimé en t/ha.

5. 4. 12. Teneur en protéines des grains du blé dur

Une fois séchés à une température de 80°C pendant 48h, les grains ont été broyés. L'analyse de l'azote puis des protéines brutes dans les échantillons en poudre a été faite selon la méthode décrite dans 3. 4. 2.

6. ANALYSES STATISTIQUES DES DONNEES

6. 1. Essais sur la diversité biologique des populations spontanées de *Hedysarum coronarium* L. et son amélioration

Pour pouvoir séparer les 27 populations spontanées (F0) à l'aide des diverses variables étudiées, nous avons eu recours à une analyse discriminante permettant de classer des groupes de génotypes distincts. Cette analyse établit un diagramme de dispersion dans lequel apparaissent à la fois les populations observées et les variables étudiées (Dagnélie, 1975). L'objectif est alors la mise en évidence des proximités naturelles entre les éléments des deux ensembles.

En premier lieu une analyse de variance a été réalisée sur toutes les variables pour montrer l'effet d'une distribution naturelle des sillas sur les différents paramètres analysés, puis une analyse factorielle par correspondance (SAS, 1985).

Dans cette partie, les diverses variables ont été analysées statistiquement par la méthode ANOVA dans le logiciel SAS (SAS, 1985). Les différences des variables d'une population 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 %.

6. 2. Essais d'évaluation des génotypes sélectionnés de *Hedysarum coronarium* L. et des systèmes de rotation

Les études sur les rotations des cultures représentent pour la recherche une source riche en informations scientifique et pratique.

Les essais sur les rotations de culture et suivis depuis au moins un siècle (Foster, 1991) ne sont pas tous conduits selon un dispositif expérimental connu. L'essai en cours est classé dans la catégorie qui englobe aussi bien des cultures annuelles de courte durée (blé, colza et féverole) que moyenne durée (deux années) comme le sulla. Pour cela, une analyse de variance des données a été faite pour chaque année au sein de chaque rotation selon les sources de variations suivantes:

- année;
- système de rotation;
- système de rotation x année; et
- erreur.

L'interaction rotation x année est d'une importance capitale pour l'analyse des variables utilisées et l'exploration des différences observées. Ces variables ont été analysées par la méthode ANOVA dans le logiciel SAS (SAS, 1985). Les différences entre les rotations ont été comparées, en utilisant le test LSD (plus petite différence significative) au seuil 5 %.

RESULTATS ET DISCUSSIONS

1. ETUDE DE LA DIVERSITE GENOTYPIQUE DE *Hedysarum coronarium* L. SAUVAGE

1. 1. Présentation des populations de *Hedysarum coronarium* L.

le sulla du nord (*Hedysarum coronarium* L.) a subit une régression en surface significative durant les trente dernières années. L'ampleur de ce phénomène varie d'une région à l'autre.

La prospection sur le terrain de 78 sites susceptibles de grouper le sulla avec d'autres espèces spontanées comme décrit par Bigot *et al.*, (1967); Gounot *et al.*, (1966); Floret *et al.*, (1967a-b); Jacquinet et Soler, (1967) a montré la répartition suivante:

- Région du Nord-est et Cap Bon: selon la carte phyto-écologique, cette région englobe 16 stations à sulla, mais lors de la prospection, seulement 12 se sont avérées renfermer des populations spontanées. Dans le grand Tunis, 3 populations ont été trouvées dont la plus importante se trouve dans la vallée de Oued Méliane.

- Région du Nord-ouest: vu ses conditions pédoclimatiques, cette zone devrait être la région à sulla de premier ordre. Sur les 30 stations prospectées, seulement 9 ont englobé une mosaïque de génotypes dont la majorité se trouve refoulée dans des endroits incultes ou difficilement accessibles.

Le reste des sites a subit une métamorphose due soit au labour des sols à végétation naturelle pour installer des cultures dont principalement le blé, soit au surpâturage qui affecte une grande partie de cette région (cas de Séjnane).

- Région du Centre et Centre-est: la présence du sulla dans cette région a été signalée depuis plus d'un siècle par Bonnet et Barrate (1896). Seulement 15 % des sites écologiques prospectés ont contenu quelques populations dispersées dans des biotopes particuliers tels que Jbel Fkirine à Oued Saouef ou Chérichira. Le surpâturage prononcé marque significativement cette zone. Cet effet tend à développer le phénomène de désertification dans certaines régions.

- Les hauts plateaux: malgré que cette région se caractérise par des conditions climatiques difficiles (très froid en hiver et très chaud en été), le sulla n'a pas manqué d'exister. Les sites de Makthar, Kesra et Théla sont considérés les seules qui ont regroupé des populations de sulla d'altitude 1000 m et plus. Sur les 12 régions prospectées, le sulla a été trouvé uniquement dans les 3 régions précédemment citées.

Selon la carte bioclimatique de Bortolli *et al.*, (1967), l'espèce *Hedysarum coronarium* L. occupe une diversité de bioclimats dans la Tunisie septentrionale. La figure 19 montre que 22 % des populations qui ont été collectées se trouvent dans des régions à bioclimat semi-aride supérieur à hiver doux. La variante bioclimat à hiver doux est aussi la plus représentée dans le subhumide où nous avons eu 19 % des sillas. Malgré que l'espèce sulla du nord soit connue par sa sensibilité aux basses températures au stade juvénile (Villax, 1963; Lapeyronie, 1982), certaines populations se trouvent dans des sites bioclimatiques à hiver frais comme c'est le cas de Oued Melliz-Ghardimaou (S16). Dans ce bioclimat, 4 % des populations ont été trouvées. En général, le sulla fuit les situations bioclimatiques extrêmes comme l'aridité du milieu (pluie inférieure à 300 mm/an) (figure, 19).

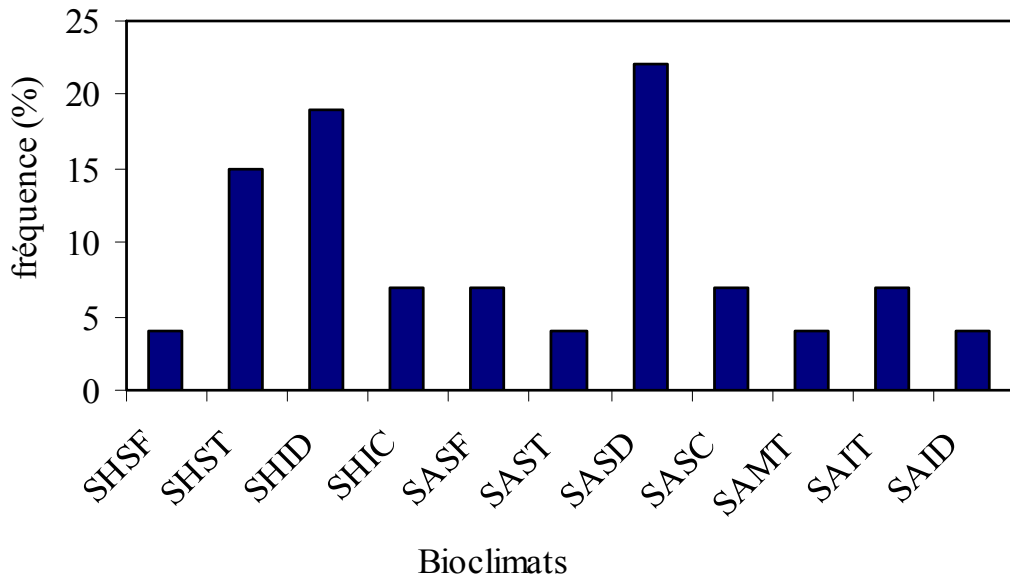


Figure 19 Répartition des populations spontanées de sulla du nord selon les bioclimats (Bortolli et al., 1967) de la Tunisie septentrionale
 SHSF: subhumide supérieur à hiver frais; SHST: subhumide supérieur à hiver tempéré; SHID: subhumide inférieur à hiver doux; SHIC: subhumide inférieur à hiver chaud; SASF: semi-aride supérieur à hiver frais; SAST: semi-aride supérieur à hiver tempéré; SASD: semi-aride supérieur à hiver doux; SASC: semi-aride supérieur à hiver chaud; SAMT: semi-aride moyen à hiver tempéré; SAIT: semi-aride inférieur à hiver tempéré; SAID: semi-aride inférieur à hiver doux

Lors de la prospection, seulement 25 % des populations spontanées du sulla du nord (*Hedysarum coronarium* L.) ont été rencontrées sur les plaines. Le reste se trouvait réparti entre les collines et les montagnes (figure 20).

Dans les plaines, les céréales ont repoussé les végétations pastorales et spontanées vers des sites marginaux. Néanmoins, ces zones considérées plus ou moins incultes ne se trouvent pas non plus épargnées.

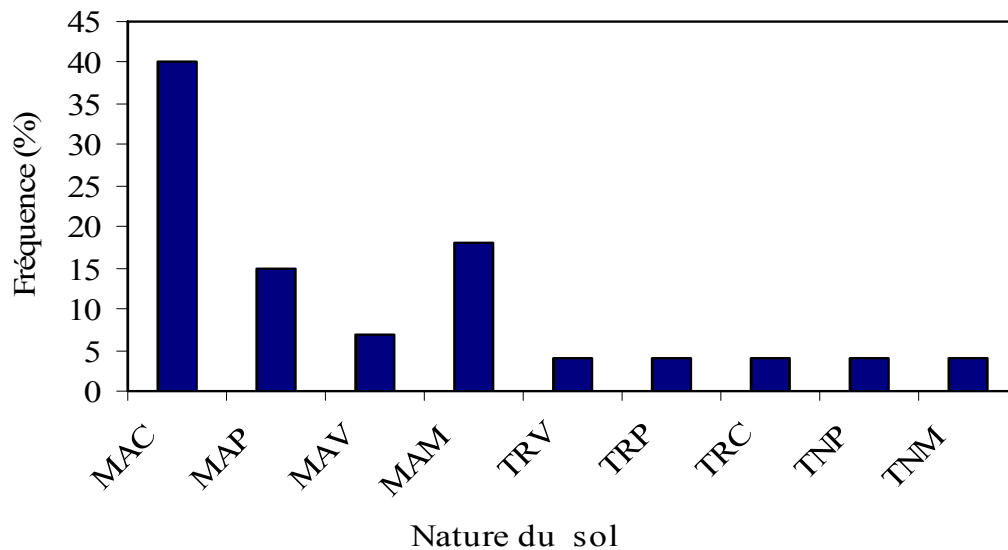


Figure 20 Répartition des populations spontanées de sulla du nord selon la nature des sols (Belkhoja et al., 1976) dans la Tunisie septentrionale
 MAC: marne sur colline; MAP: marne sur plaine; MAV: marne sur vallée; MAM: marne sur montagne; TRV: terre rouge sur vallée; TRP: terre rouge sur plaine; TRC: terre rouge sur colline; TNP: terre noire sur plaine; TNM: terre noire sur montagne

La marne représente le substrat préféré de cette espèce. En effet, 80 % des populations prospectées se développent sur ce type de sol, dont la moitié sur les collines. Ces dernières sont sujettes à des pâturages illicites qui contribuent à dégrader la végétation naturelle entre autres le sulla.

La diversité d'adaptation du sulla du nord à des conditions pédoclimatiques différentes joue un rôle important dans le programme de sélection ultérieur. Cette capacité d'adaptation crée une certaine variabilité génétique à l'intérieur de l'espèce. Ainsi, à partir de différentes plantes de sulla, il devient possible de sélectionner encore une autre diversité. De plus, l'amélioration génétique au sein d'une espèce n'est possible que s'ils existent une variabilité génétique, puis une sélection pour passer à la génération suivante.

La répartition de *Hedysarum coronarium* L. dans les divers milieux pédoclimatiques précédemment cités, a été complété par des observations du port des plantes. Ce port nous a donné des informations utiles pour une utilisation ultérieure.

Tableau 20 Répartition des populations prospectées du sulla du nord selon l'architecture du port des plantes

Architecture des populations	fréquence (%)
strictement plagiotrope	11
plagiotrope	29
mixte	56
orthotrope	4

La majorité des populations (56 %) s'est caractérisée par des tiges mixtes. Le type érigé ou orthotrope est le moins présent (4 %). La mixture des tiges dans une même plante serait une forme d'adaptation au surpâturage. Les tiges érigées sont toujours les premières à être broutées. Pendant ce temps, les rampantes épargnées du pâturage continuent à croître jusqu'à formation des semences pour assurer la descendance.

1. 2. Evaluation du matériel séminal des populations sauvages de *Hedysarum coronarium* L.

Les quantités de semences ramassées sous forme de gousses ont varié de 50 à 300 g par site de collecte. Cette variation ne dépend pas seulement de l'étage bioclimatique mais aussi de la nature du substrat. Contrairement aux populations de montagnes qui ont fourni entre 50 et 180 g de semences, celles des plaines étaient plus généreuses et ont donné jusqu'à 300 g comme c'est le cas du sulla Ksar Mézouar (S4).

1. 2. 1. Variation du poids de mille graines

Une différence significative a été observée entre les divers poids de mille graines (PMG) prélevés sur les 27 populations du sulla du nord. En effet, ces PMG ont varié de 3,2 à 5,8 g (figure 21).

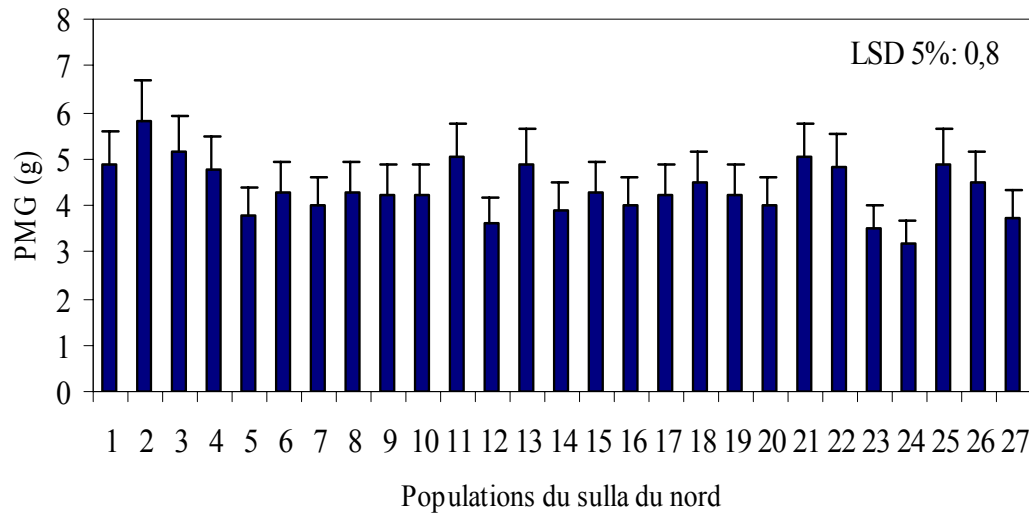


Figure 21 Variation du poids de mille graines entre les diverses populations du sulla du nord sauvage

Le sulla Oued Zerga (S2) a été caractérisé par le plus grand poids de mille graines (5,8 g). L'humidité du site du sulla S2 combinée à la richesse du sol en matière organique (4,2 %), a joué en faveur d'une production de graines de grande taille. Les variations importantes de PMG entre les populations de sulla est une conséquence de la diversité écologique des sites. Cependant, L'effet génotypique sur la variation du PMG n'apparaît que dans le cas où toutes les populations seront semées dans un même environnement.

Les sols bien pourvus en matière organique ont une capacité de rétention d'eau plus importante que les sols en pente peu profonds ou pauvres. En effet, le poids de mille graines est considéré comme un des paramètres sensibles au manque d'eau (Miller et Burke, 1983, Singh, 1995; FRAB, 2004). Une corrélation significative a été trouvée entre Les PMG des sullas et les taux de matière organique des sites de collecte (figure 22). La production de semences à PMG élevé est plutôt liée à la teneur du sol en matière organique que la pluviométrie du site. Malgré l'aridité du climat du site de Chérichira (S25) dont la pluviométrie est de 310 mm, ce sulla a produit des graines à PMG de 5 g nettement supérieur à celui de S23 situé dans le subhumide à pluviométrie de 720 mm, mais avec un taux de matières organiques de 1,5 %.

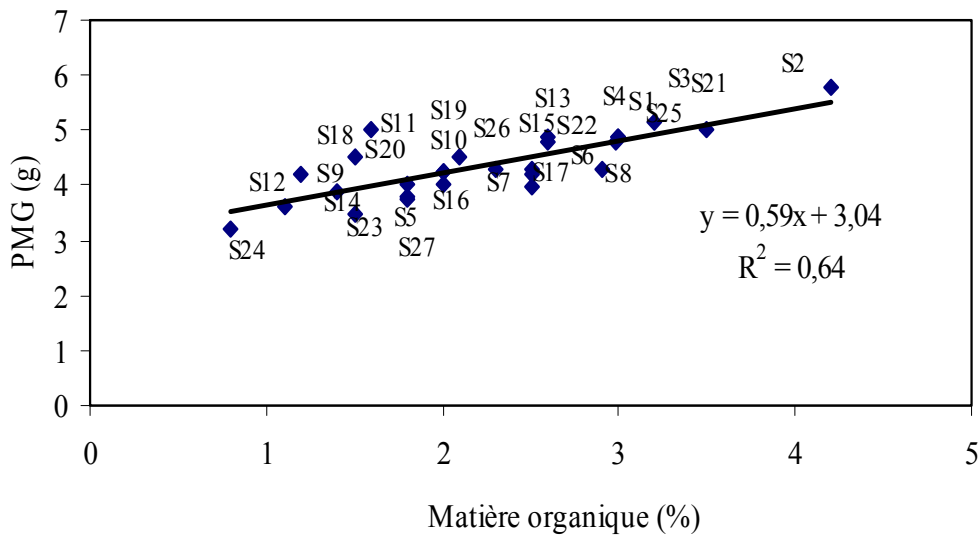


Figure 22 Effet des teneurs en matière organique des sites de collecte sur la variation du poids de mille graines des populations du sulla local

Dans les sites semi-arides et à faible taux de matière organique, la production de graines de grande taille par certains génotypes comme S11 à PMG de 5,03 g pourrait être liée au facteur d'adaptation du génotype à son milieu. En effet, Diz et Schank (1995) ont trouvé un comportement similaire avec le millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) semé 2 années de suite à pluviométrie différente. Ce comportement serait important dans la mesure où on compte sélectionner des génotypes capables de produire des semences à PMG qui ne serait pas affecté par un déficit hydrique.

1. 2. 2. Comportement germinatif suite à une variation thermique

Afin de classer les génotypes entre eux, la réponse de la germination des semences à une variation de température est considérée comme un facteur essentiel pour une meilleure installation (Massawe *et al.* 2003). La température prise comme un facteur environnemental influe sur la germination des semences de sulla d'une manière hautement significative.

A 5°C, seul le sulla S1 commence à germer après 48 h d'incubation, pour atteindre un taux de germination de 38 % après 4 jours, alors que sa germination a atteint déjà un taux de 96 % à 20°C après seulement 48 h. La perméabilité tégumentaire de ce sulla fait que l'absorption d'eau par les graines est rapide, entraînant une activité métabolique intense pour induire une bonne germination. Dans ce cas, la germination devient étroitement dépendante de la température d'incubation et de l'humidité de départ de la semence (Lestander, 1988).

La majorité des populations ont fourni le maximum de germination à 10°C (tableau, 21). Les facultés germinatives ont varié de 94 à 30 % respectivement pour les sillas S1 et S7.

Tableau 21 Classification des populations de silla selon leur faculté germinative maximale atteinte à différentes températures

Températures (°C)	génotypes ayant une faculté germinative maximale
5	S1, S7, S9
10	S2, S3, S4, S5, S8, S12, S18, S19, S20, S26
15	S11, S13, S14, S15, S16, S21, S22, S25
20	S10, S24, S27
25	S6, S17, S23
30	
35	

La germination à 25°C (G25) est souvent prise comme une référence pour comparer les autres germinations à différentes températures (ISTA, 1985). Pour cela, on calcule un rapport dit variation germinative entre la germination à une température donnée (Gt) et la G25. La température de 25°C favorise la meilleure germination pour seulement trois sillas à savoir S6; S17 et S23. Ce comportement germinatif montre que l'espèce *Hedysarum coronarium* L. a tendance à mieux germer à des températures comprises entre 10 et 15°C. Contrairement à ISTA (1999) qui a montré que l'optimum de germination du silla est réalisé entre 20 et 30°C .

Les températures supérieures à 25°C tendent à baisser la faculté germinative de toutes les populations. Par rapport au G25, le taux de réduction de la germination peut atteindre 100 % (cas de S27). Certains génotypes comme S1; S4 ; S24; S25 et S26 tolèrent mieux les températures élevées (35°C) que les autres sillas, leurs variations germinatives par rapport au G25 ne dépassent alors guère 20 % (figures 23a; 23b et 23c).

La température 5°C a un effet positif sur 48 % des sillas spontanés. Une amélioration de 20 % de la germination du silla S18 est un exemple concret pour cette température

Partie 3

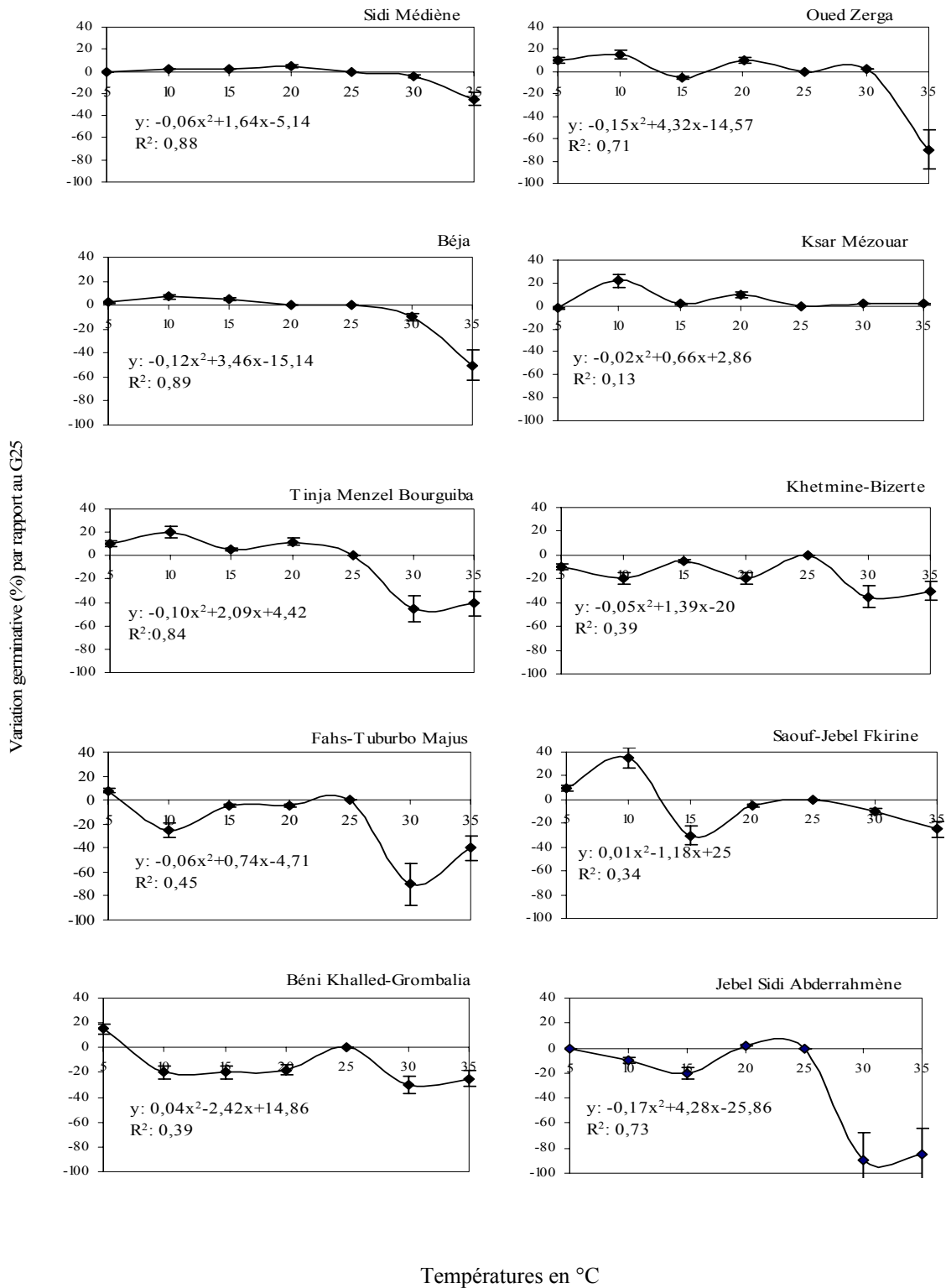


Figure 23a Effet de la température sur la variation germinative des sillas par rapport au G25

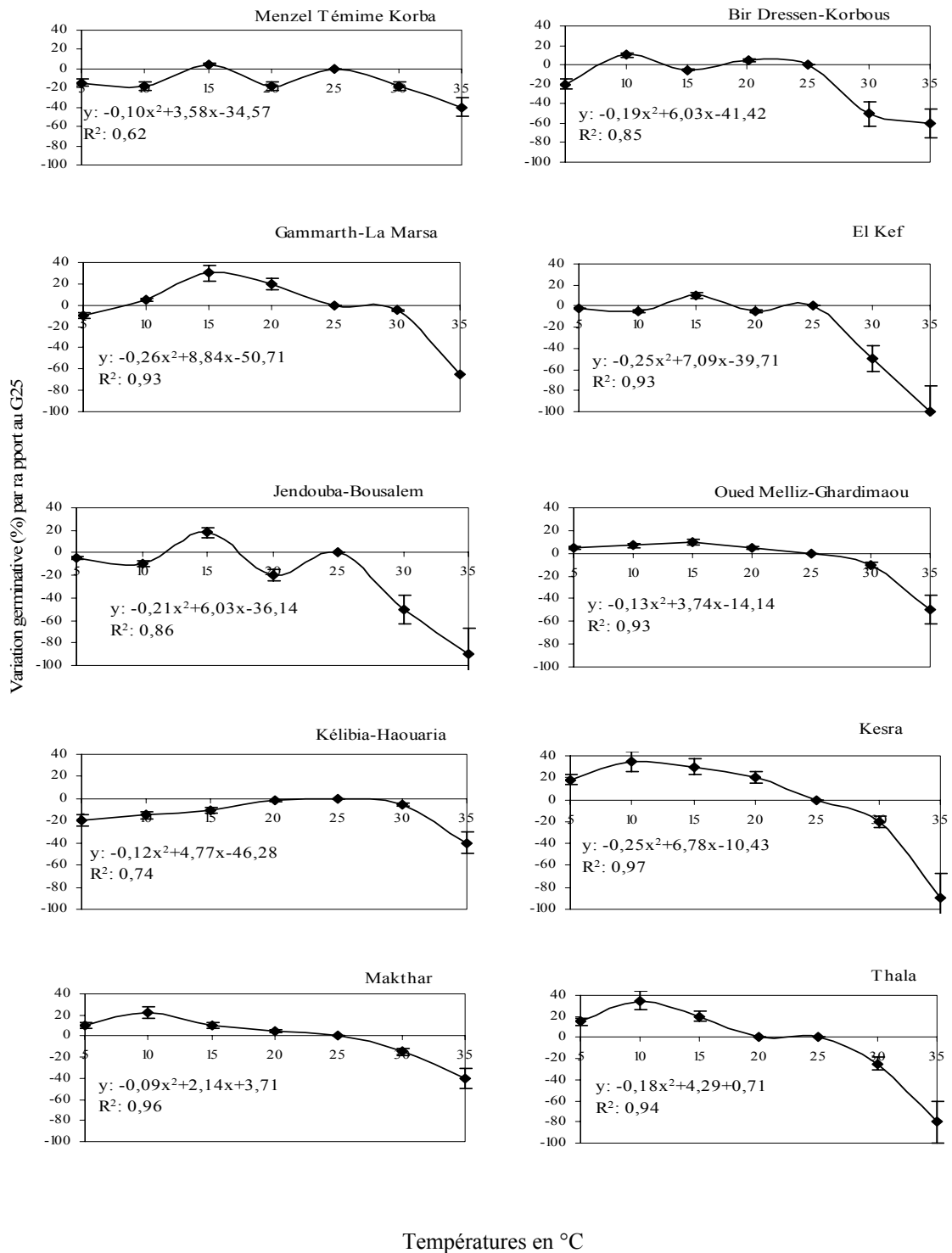


Figure 23b Effet de la température sur la variation germinative des sillas par rapport au G25

Partie 3

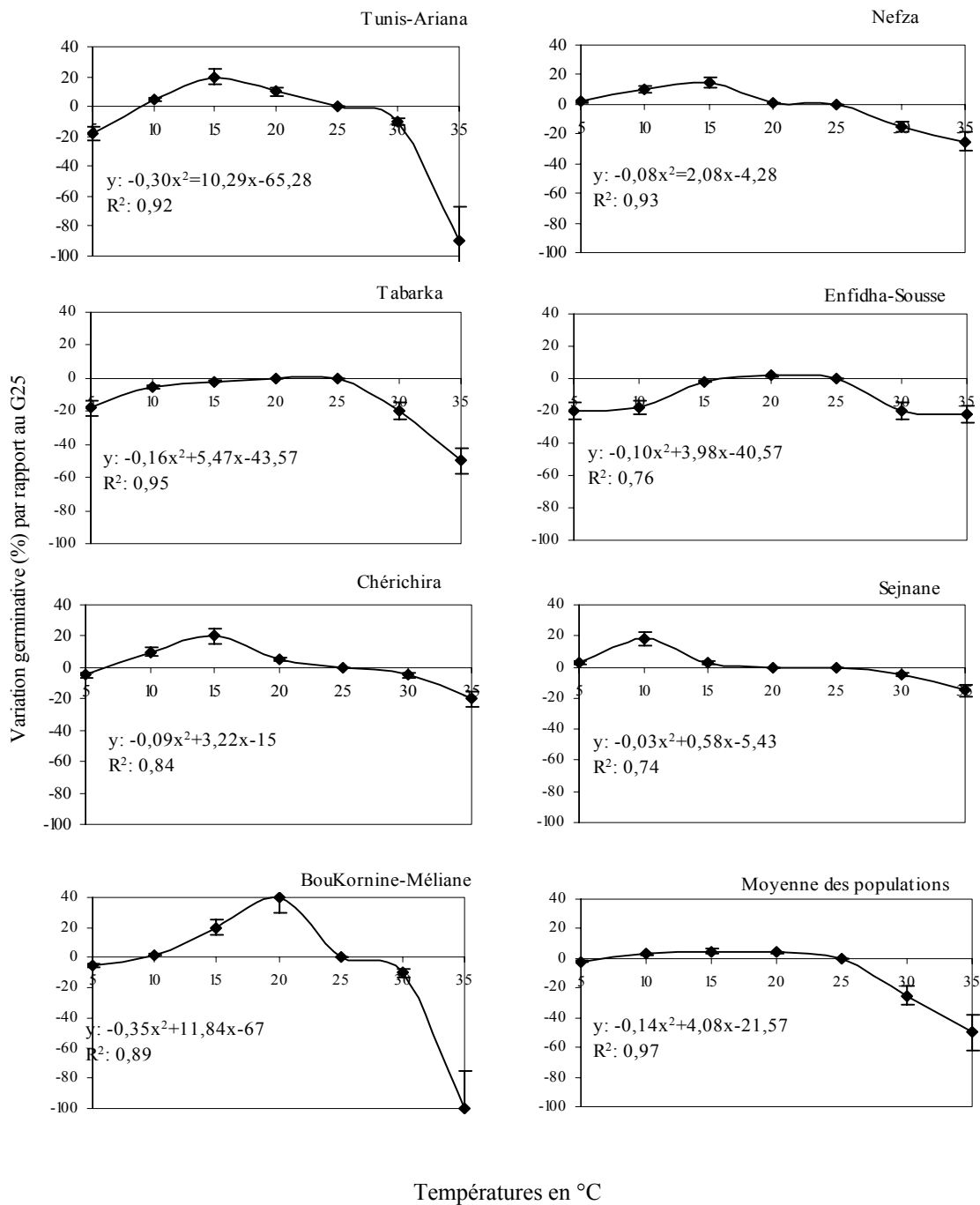


Figure 23c Effet de la température sur la variation germinative des sulas par rapport au G25

En général, la réponse de la germination des sulas à une variation de température peut aider à identifier la région géographique où le génotype peut être semé ultérieurement avec succès.

1. 2. 3. Estimation des graines dures

Deux principaux mécanismes influencent de manière significative la germination des fabacées, les graines dures et la dormance embryonnaire (Quinlivan et Nicol, 1971). Cette dernière est non significative pour la majorité des fabacées annuelles (Reed *et al.*, 1989). Alors que les graines dures peuvent causer une irrégularité de levée des plantes dans le temps et nuire au développement ultérieur de la culture.

En zone méditerranéenne, la majorité des fabacées spontanées se caractérisent par un taux de graines dures plus ou moins important (Taylor, 1996). A la température de germination maximale, les populations spontanées de *Hedysarum coronarium* L. se sont caractérisées par la présence d'un taux de graines dures très variable. Ces taux ont varié de 4 à 85 % (figure, 24). Seulement, 11 % des sulla ont présenté un taux de graines dures inférieur à 25 %. Les taux très élevés de graines dures signalés par des auteurs comme Lapeyronie en 1982 ne sont valables que pour certaines populations.

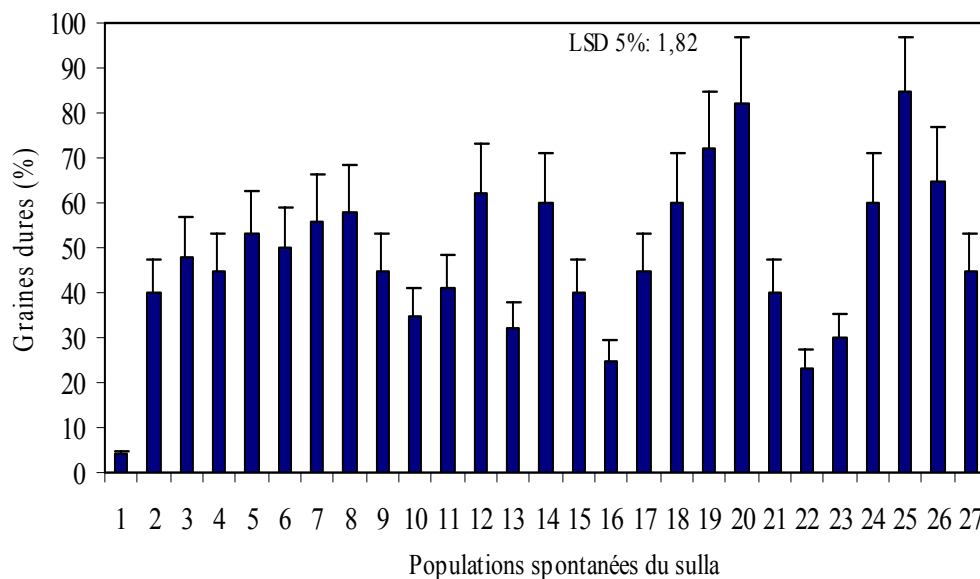


Figure 24 Taux de graines dures des populations de sulla à la température induisant le maximum de germination

La présence de graines dures dans un lot de semences est un critère parfois recherché dans les parcours des régions semi-arides et arides. L'irrégularité ainsi que la faible quantité de pluies favorisent alors une distribution de la germination progressive et étalée dans l'espace et dans le temps (Eira et Caldas, 2000). Ceci représente un mécanisme d'adaptation à la survie des espèces durant de longues périodes de sécheresse (Moore, 1989; Mackay, Davis et Sankhla, 1995).

Longer et Degago (1996) ont montré que la présence de graines dures dans un lot de semences est un facteur génétique mais qui peut être influencé par l'environnement. Le lien entre la taille et le taux de graines dures signalé par Moore en 1991 n'a pas été observé chez *Hedysarum coronarium* L.. Les sillas S1 et S25 se sont caractérisés par le même poids de mille graines (4,9 g), alors que leurs taux de graines dures était respectivement de 4 et 85 %. Moore (2000) a signalé que les caractéristiques des graines dures dans un génotype donné sont contrôlées par un gène majeur et dominant et deux autres variants qui pourraient être respectivement sous le contrôle de la température et de l'humidité.

1.3. Effet du degré d'humidité des semences de *Hedysarum coronarium* L. sur leur germination après conservation à différentes températures

Une des contraintes majeures de la conservation des semences à température ambiante est la perte de leur viabilité. La collection de semences du Laboratoire de Productions Fourragère et Pastorale de l'INAT à Tunis est un exemple intéressant à citer. Après 2 années de conservation à température ambiante non contrôlée, les semences de diverses espèces fourragères tendent à perdre leur pouvoir germinatif. Cette perte devient très importante après 4 années. Le silla (*Hedysarum coronarium* L.) perd ainsi 45,2 % de sa germination initiale. Le bersim (*Trifolium alexandrinum* L.) et l'orge (*Hordeum vulgare* L.) forment un groupe d'espèces fourragères qui enregistrent le plus fort taux de perte de germination (97 % par rapport à leur germination initiale) au cours de la 6^{ème} année de conservation (figure 25).

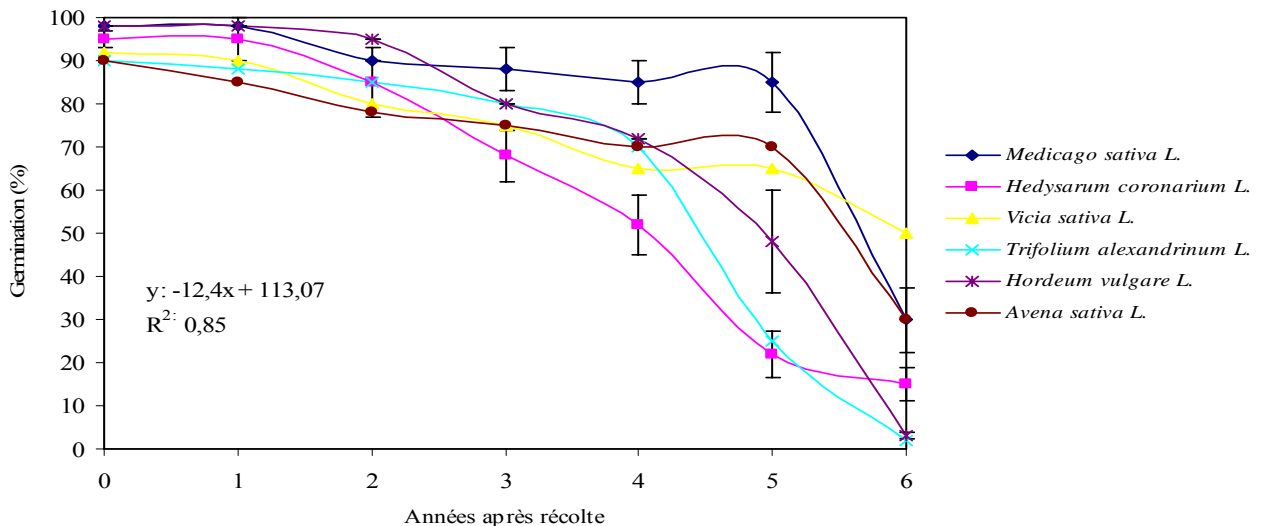


Figure 25 Germination des semences de quelques espèces fourragères conservées à température ambiante au Laboratoire de Productions Fourragère et Pastorale, INA Tunisie

A température ambiante, certaines espèces de fabacées riches en huile comme le soja (*Glycine max* (L.) Merr.) qui voit chuter brutalement sa germination après deux mois de conservation (Anon, 1990). Certains auteurs, indiquent que cette perte de germination est liée directement à la température et l'humidité relative des semences (Reddy *et al.*, 1992). Ces deux facteurs ont un effet interactif hautement significatif sur le pouvoir germinatif des graines du sulla après conservation (tableau, 22).

Tableau 22 Carrés moyens de la germination des semences du sulla du nord à humidité variables après conservation à différentes températures
** : test hautement significatif au seuil 1%; CV: coefficient de variation

source de variation	ddl	carré moyen
températures	3	125,96**
humidité	3	387,24**
température x humidité	9	215,24**
CV %		24,25

Contrairement à d'autres espèces comme les maraîchères (Ellis *et al.*, 1996), la température 20°C signalée bénéfique pour une conservation longue durée des semences ne permet pas de prolonger la longévité des graines de sulla au-delà de deux années même si leur humidité est de 4 %. Leur germination a été inférieure à 20 % (figure 26).

Les semences à faible taux d'humidité (4 %) et qui ont été conservées à -18°C ont continué à germer après cinq années avec un taux de 80 %. Même la germination des graines relativement humides 8 et 13 % n'a pas chuté brutalement, elle s'est maintenue à 40 %. Cette température permet de conserver efficacement les ressources phyto-génétiques (FAO-IPGRI, 1994).

Quant à la réfrigération à 5°C, elle permet de conserver 50 % de la germination des semences à 4 et 8 % d'humidité jusqu'à 2 années.

La germination des graines de sulla à taux d'humidité élevé (21 %) et conservées à température ambiante n'ont pas gardé longtemps une bonne germination. Leur faculté germinative a baissé rapidement de 93 à 43 % après seulement 37 jours de conservation. Dans cette situation, seules les graines à 4 % d'humidité arrivent à maintenir une bonne germination pour un maximum de 2 ans.

L'humidité relative des semences représente un facteur déterminant pour la réussite de leur conservation. Cependant, Le contrôle de l'humidité des semences devient une action capitale avant toute opération de conservation.

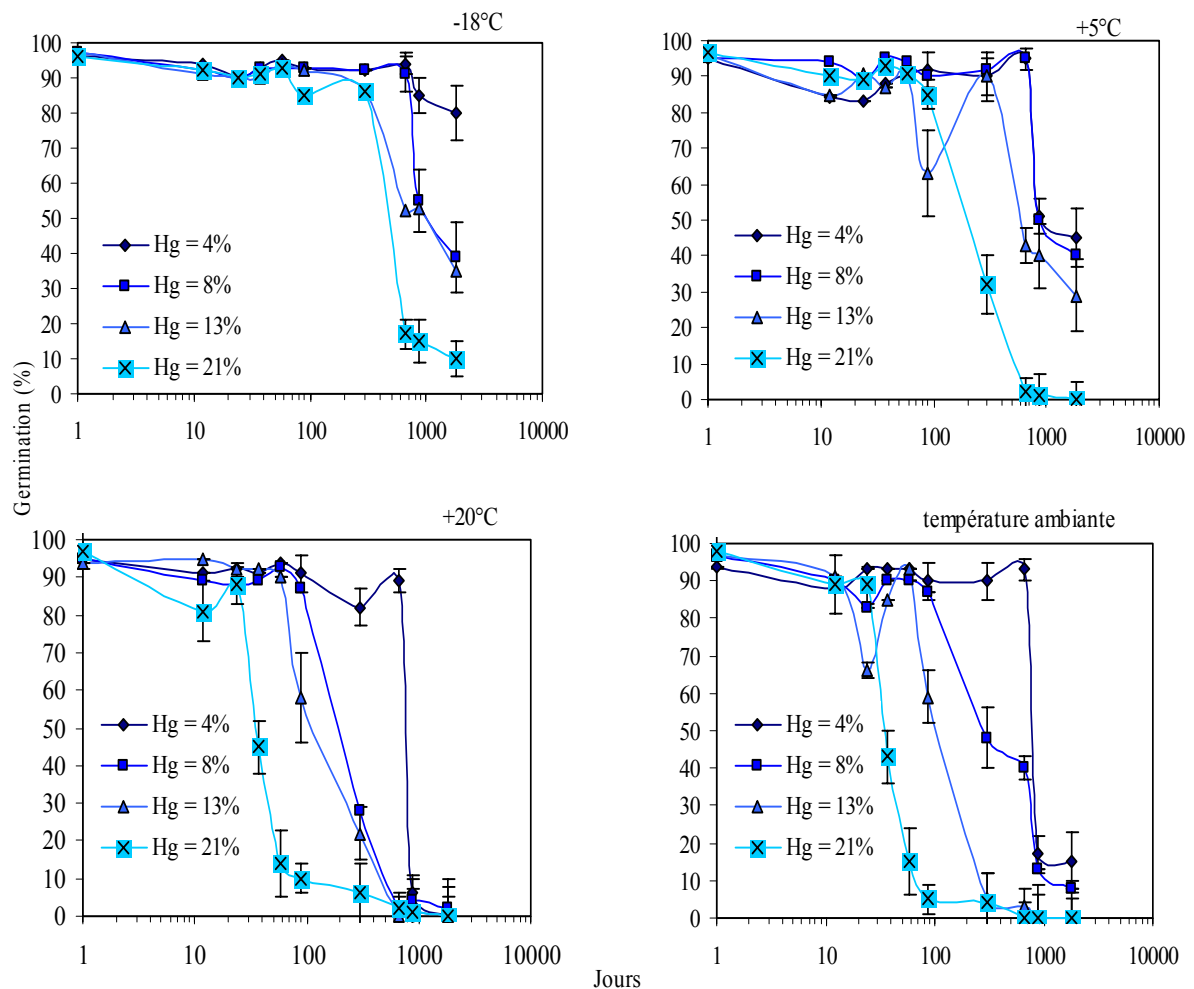


Figure 26 Evolution dans le temps (selon une échelle logarithmique) de la germination des graines de *Hedysarum coronarium* L. à humidité (Hg) variable après conservation à différentes températures

1. 4. Analyse de la diversité génotypique des populations sauvages de *Hedysarum coronarium* L.

D'un site à l'autre, le sulla spontané s'est caractérisé par une grande diversité biologique. Cependant, cette diversité se trouve menacée par des contraintes de nature biotiques et abiotiques. Le pâturage anarchique représente le facteur qui a le plus participé à la disparition progressive du sulla de certains endroits (Ben Jeddi, 2002 et Ben Jeddi, 2004). En plus, l'installation sporadique de céréales a favorisé cette érosion génétique (Zouaghi, 1998).

Cette diversité se trouve encore menacée par introduction de variétés étrangères de sulla pouvant polliniser les populations spontanées. Ceci serait à l'origine de l'introduction de l'oïdium (*Erysiphe trifolii* var. *intermedia* (U. Braun) (U. Braun et S. Takam) dans les populations du sulla local.

Actuellement, certains génotypes locaux commencent à développer les symptômes de ce champignon (Ben Jeddi *et al.*, 1998). Le transfert de gènes par allogamie des variétés introduites au sulla local aurait favorisé l'apparition de l'oïdium sur ces génotypes. Leur dénaturation d'une génération à l'autre peut entraîner la disparition de certains caractères recherchés comme la tolérance à certaines maladies ou à des facteurs abiotiques entre autres les stress hydrique et salin. Cette dénaturation du germoplasme fourrager local a déjà touché une variété locale de luzerne dite Gabès (*Medicago sativa* L.), connue par sa haute tolérance au sel. Ce génotype ne l'est plus actuellement suite à des mélanges par pollinisation avec des luzernes étrangères depuis les années '70 (Zouaghi, 1998).

Dans ce cas, le recours aux banques de gènes peut-il résoudre ce problème et revenir au matériel génétique initial s'il est bien conservé? Il est évident que les banques de gènes assurent avant tout la conservation des ressources génétiques dans les meilleures conditions, puis elles représentent le point de départ de toute action qui touche l'amélioration génétique de ces ressources. De ce fait, nous nous sommes intéressés en premier lieu à la conservation de l'espèce *Hedysarum coronarium* L.

L'évaluation de plusieurs paramètres qui ont intéressé la semence, l'inflorescence, la croissance, le potentiel productif et la qualité du fourrage (tableaux annexe, I a,b,c et d) de 27 populations locales de sulla du nord met au point une série de données très ramifiée. L'analyse de la variance au seuil 5 % des 36 paramètres étudiés a montré une différence significative entre les populations de sulla. Pour mieux différencier ces sullas, l'analyse discriminante a déterminé un ensemble de groupes distincts ayant des caractères spécifiques particuliers.

En effet, trois principaux axes discriminants 1, 2 et 3 contribuent à expliquer 82,9 % de l'inertie totale de l'ensemble des génotypes projetés sur le graphique plan (figure 27). L'axe 1 absorbe 54,7 % de cette inertie, et il est fortement corrélé avec les génotypes S7, S12 et S16. Le reste de l'inertie 19 et 12,5 % est absorbé respectivement par les axes 2 et 3. Les corrélations sont relativement importantes avec les sullas S22 et S23 en présentation sur les axes 1-3.

L'axe 1 est défini du côté positif par les taux de graines dures (TGD), longueur des rameaux au stade floral (LRF) et la surface foliaire à l'installation (SFI) et par le diamètre des tiges au printemps (DTP) et la longueur des tiges au stade floral (LTF) du côté négatif. L'axe 2 est un axe de PMG (poids de mille graines, SFI (surface foliaire à l'installation et SFP (surface foliaire au printemps)). Le premier axe oppose les populations à graines dures relativement élevées comme S14; S18 ; S19 aux populations à plus faible taux comme S1; S2; S3. Dans le même sens, l'axe 2 oppose les sullas à grosses graines (S3; S4; S21; S25...) aux sullas à petites graines comme S12; S23; S24. Alors que, l'axe 3 oppose les populations productives S1, S2 et S6 aux moins productives comme les sullas S18, S23 et S24 (figure 27).

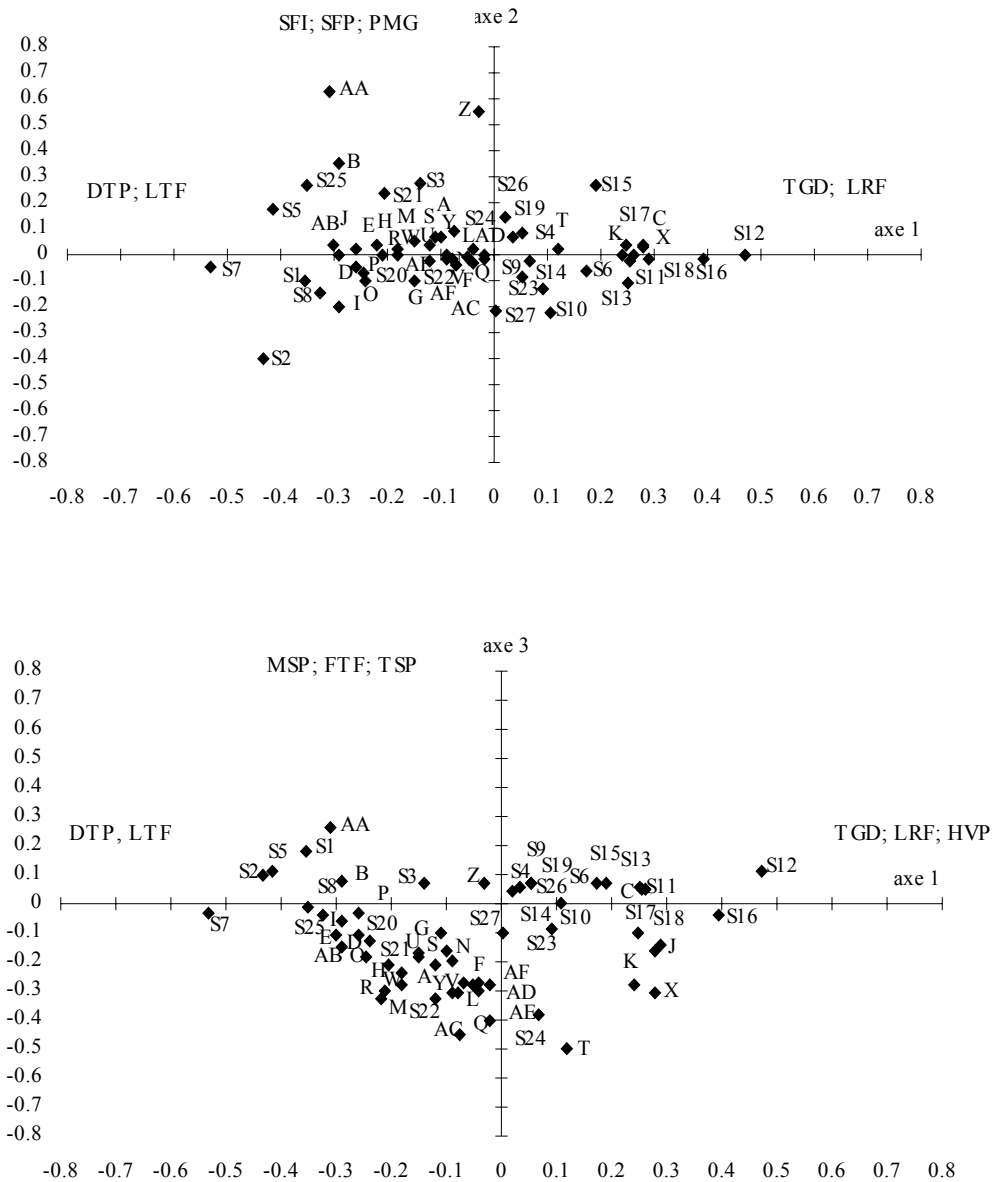


Figure 27

Projection plane des trois principaux axes discriminants avec les 27 populations sauvages du sulla du nord et leurs variables d'évaluation

A: SFH; B: SFP; C: SFF; D: HVH; E: HVP; F: TSH; G: TSP; H: BSH; I: BSP; J: TRF; K: LRF; L: TFM; M: LFM; N: NFI; O: LIF; P: DTP; Q: FTH; U: FTP; V: PMG; W: TGD; X: SFC; Y: TCP; Z: SFU; AA: TRT; AB: SFI; AC: LTH; AD: LTP; AE: LTF; AF: TEF; AG: TAF; AH: TCF; AI: LEF; AJ: G20; AK: G05; AL: TMG; AM: G35

La similarité génotypique entre les différentes populations a été calculée en utilisant le coefficient dit *simple matching* (Sneath et Sokal, 1973) qui indique le degré de similarité entre les populations multivariées à partir des points différents (Johnson, 1976).

Cet indice a été déterminé à partir de la matrice des corrélations entre les populations et les variables étudiés. L'analyse *cluster* selon la méthode UPGMA (Sneath et Sokal, 1973) qui est basée sur l'utilisation d'une distance entre 2 agrégats du *cluster* découlant d'une distance moyenne entre un point dans un agrégat et un point dans l'autre, a généré le dendrogramme illustré dans la figure 28. L'indice de similarité des populations de sulla a varié de 0,54 à 0,78.

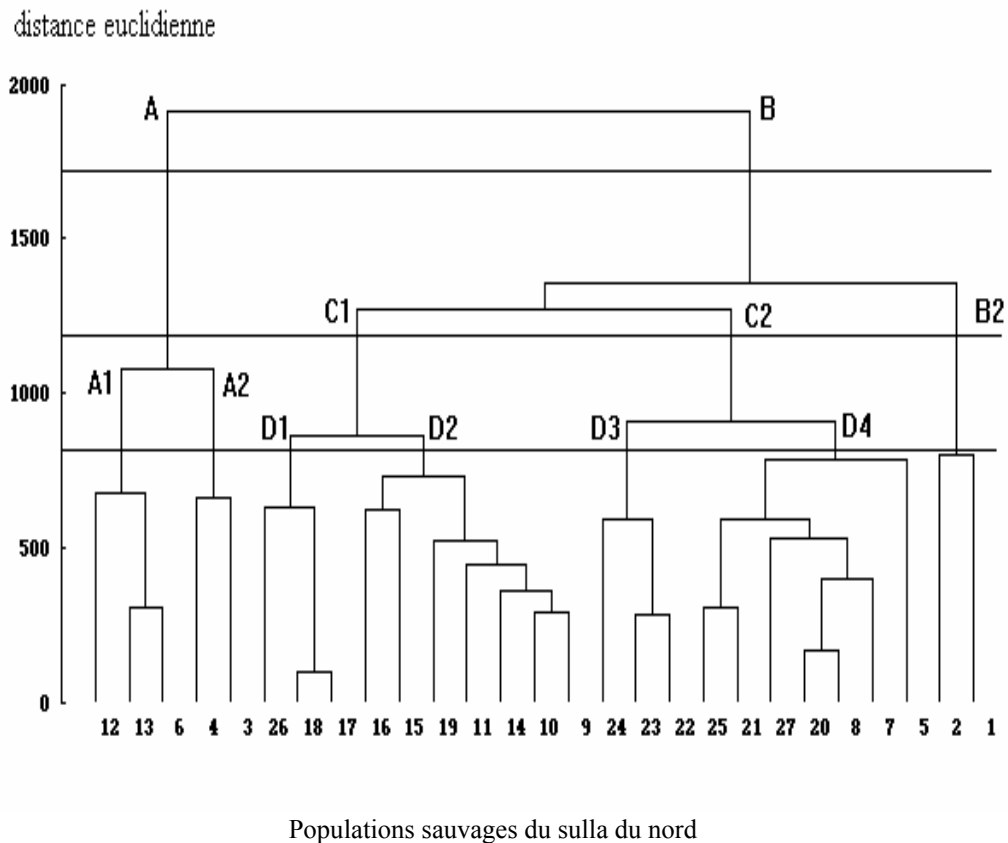


Figure 28 Dendrogramme de similarité des populations sauvages du sulla du nord selon les distances euclidiennes

Ce dendrogramme met en évidence une différence nette entre les populations spontanées de *Hedysarum coronarium* L.. Ceci révèle la conclusion sur une possibilité d'amélioration génétique au sein de l'espèce où on peut isoler des groupes intéressants pour la sélection ultérieure.

A partir de ce dendrogramme de similarité, trois niveaux de différence ont été dégagés. Le premier niveau est formé par deux groupes A et B. Le groupe A comporte seulement 5 sullas (S3, S4, S6, S13 et S12), le reste des 27 génotypes constitue le groupe B. Cette première ségrégation se fait à une distance euclidienne supérieure à 1300 (figure 28).

Les sillas du groupe A, se sont caractérisés par une installation rapide suivie d'une croissance hivernale (janvier) plus élevée de 43 % par rapport au groupe B. La production hivernale est considérée comme un des critères de sélection abordé dans ce travail, elle se trouve dans A plus importante de 48 % par rapport à B. Les génotypes de A ont eu aussi une meilleure hauteur de végétation et surface foliaire printanière plus élevée de 54 % comparés au groupe génotypique B. Cette particularité leur confère une précocité de coupe surtout en hiver (janvier) (tableaux 23a; 23b et 23c).

Tableau 23a Répartition en groupes (G) des populations spontanées de *Hedysarum coronarium* L. selon la moyenne des paramètres étudiés

SFI, SFH, SFP: surfaces foliaires respectives à l'installation, hivernale et printanière; BSH, BSP: matières sèches hivernale et printanière; TSP: taux de la matière sèche printanier; FTP: rapport feuilles sur tiges au stade floral; TRT: taux de ramification tertiaire; LTF, LIF: longueurs de la tige et de l'inflorescence au stade floral; NFI: nombre de fleurs par inflorescence; DTP: diamètre de la tige principale au stade floral

G	SFI	SFH	SFP	BSH	BSP	TSP	FTP	TRT	LTF	LIF	NFI	DTP
	cm ²			g/m		%		%	cm			cm
<u>niveau 2 groupes</u>												
A	16,6	60,5	663,9	185,8	1096,3	16,7	0,7	32,7	82,5	19,2	69,3	1,1
B	9,7	34,6	447,9	97,1	868,6	16,5	0,6	38,2	55,0	19,1	53,6	0,8
<u>niveau 4 groupes</u>												
A	16,6	60,5	663,9	185,8	1096,3	16,7	0,7	32,7	82,5	19,2	69,3	1,1
B2	10,0	40,2	570,6	102,7	1848,6	25,3	0,8	3,3	107,5	32,9	79,5	1,8
C1	8,6	29,5	375,9	68,6	707,4	15,4	0,5	50,5	44,3	16,4	51,9	0,6
C2	9,8	37,4	457,2	123,1	795,7	15,9	0,7	33,2	53,2	18,7	51,6	0,8
<u>niveau 7 groupes</u>												
A1	13,0	56,6	415,8	150,3	1058,8	17,2	0,8	54,4	48,1	15,5	58,3	0,9
A2	21,9	66,2	1035,9	239,1	1152,6	15,9	0,6	0,0	134,2	24,6	85,7	1,6
B2	10,0	40,2	570,6	102,7	1848,6	25,3	0,8	3,3	107,5	32,9	79,5	1,8
D1	9,6	21,1	349,2	55,8	496,9	13,4	0,5	41,2	44,3	15,2	61,8	0,6
D2	9,4	37,4	457,2	123,1	795,7	15,9	0,4	53,9	53,2	17,5	45,5	0,7
D3	9,3	31,3	202,4	120,8	385,8	14,4	0,9	32,4	31,3	13,9	53,6	0,5
D4	10,1	40,0	566,4	124,2	971,4	16,5	0,7	33,5	62,6	20,8	50,7	0,9

A une distance euclidienne de 1250, inférieure à la première classification, quatre groupes distincts ont été différenciés. Dans ce cas, le groupe B se bifurque en 3 classes (B2, C1 et C2). Seulement deux génotypes forment le groupe B2 qui se caractérisent par des plantes de grande taille (>100 cm) au stade floral. Le diamètre des tiges est aussi élevé (1,8 cm). Cette particularité fait de ces sillas les meilleurs producteurs de matière sèche.

Un des critères de sélection recherché pour le sulla est le taux de matière sèche qui est souvent faible chez Sgaravatti même au stade floraison (14-15 %). Les sullas S1 et S2 qui forment le groupe B2 sont les seuls qui ont un taux de matière sèche supérieur à 20 % au stade floral. Ces sullas n'ont pas une grande ramification car la moyenne du nombre des rameaux ne dépasse pas 4 contre 15,2 dans le groupe C1 formé par S9, S10; S11; S12; S14; S15; S16; S17; S18; et S26. La partie foliaire (limbe + pétiole) du groupe A a été la plus grande vu la longueur des feuilles qui dépasse 59 cm.

Les inflorescences des sullas du groupe B2 ont eu aussi un développement important avec une longueur moyenne de 32,9 cm et un nombre de fleurs supérieur à 75 par inflorescence (tableaux 23a et 23b). La partie séminale se distingue du reste des groupes par le plus faible taux de graines dures (3,8 %). En plus, un meilleur taux de germination de 96 % a été obtenu à 05°C.

Tableau 23b Répartition en groupes (G) des populations spontanées de *Hedysarum coronarium* L. selon la moyenne des paramètres étudiés

SFF: surface foliaire au stade floral; HVH, HVP: hauteur de la végétation hivernale et printanière; TSH: taux de la matière sèche en hiver; TRF: total des rameaux au stade floral; LRF: longueur des rameaux au stade floral; TFM: rapport longueur sur largeur de la feuille médiane; LFM: longueur de la feuille médiane; FTH: rapport feuilles sur tiges en hiver; PMG: poids de mille graines; TGD: taux de graines dures; SFC: surface foliaire cotylédonaire

G	SFF cm ²	HVH cm	HVP	TSH %	TRF	LRF cm	TFM	LFM cm	FTH	PMG g	TGD %	SFC cm ²
<u>niveau 2 groupes</u>												
A	3143,7	35,7	82,3	11,1	8,3	94,2	1,7	45,9	1,3	5,2	68,3	1,1
B	1441,3	24,2	55,4	11,7	11,1	76,0	1,6	51,5	1,9	4,4	71,2	0,8
<u>niveau 4 groupes</u>												
A	3143,7	35,7	82,3	11,1	8,3	94,2	1,7	45,9	1,3	5,2	68,3	1,1
B2	1382,8	44,7	109,0	11,2	3,8	19,0	1,4	59,3	1,4	4,9	3,8	1,0
C1	2118,7	17,7	45,6	12,2	15,2	98,1	1,6	47,0	2,0	4,2	79,6	0,7
C2	899,6	25,7	52,9	11,4	7,9	64,4	1,6	52,3	1,9	4,5	74,3	0,8
<u>niveau 7 groupes</u>												
A1	3445,5	24,8	48,9	10,9	9,9	111,0	1,7	39,5	1,5	4,5	74,5	0,8
A2	2691,1	52,0	132,5	11,5	6,0	69,0	1,8	55,4	0,9	5,0	58,8	1,5
B2	1382,8	44,7	109,0	11,2	3,8	19,0	1,5	59,3	1,4	4,9	3,8	1,0
D1	1568,5	16,3	43,3	12,9	12,1	91,3	1,7	46,6	1,8	4,4	71,2	0,8
D2	2177,5	19,6	48,8	11,9	17,2	102,4	1,7	50,3	2,1	4,1	85,9	0,7
D3	736,6	23,4	31,1	11,9	4,6	55,0	1,5	52,5	2,1	4,1	87,7	0,7
D4	969,4	26,7	62,2	11,2	9,3	68,4	1,6	52,1	1,8	4,7	68,6	0,8

Vu cette diversité très importante, le groupe B2 peut être considéré comme un ensemble de plantes très utiles pour le programme d'amélioration du sulla sauvage. La ramification des plantes appartenant au groupe C1 est la plus élevée (15,2 rameaux/plante) de tous les autres groupes, mais la production de matière sèche hivernale est nettement plus faible (68,6 g/m).

A une distance euclidienne de 800, sept groupes ont été mis en évidence de l'ensemble des génotypes de sulla (A1, A2, B2, D1, D2, D3 et D4). Deux génotypes S3 et S4 du groupe A2 se sont distingués du reste par une absence de ramification tertiaire; mais la hauteur de ces sullas au stade floral est nettement supérieure (132,5 cm). Leur surface foliaire dépasse 1000 cm²/plante contre 202,4 cm²/plante pour le groupe D3. Ce dernier, renferme les sullas de taille courte ne dépassant pas 32 cm de hauteur de végétation au printemps (avril).

Tableau 23c Répartition en groupes (G) des populations spontanées de *Hedysarum coronarium* L selon la moyenne des paramètres étudiés

TCP: rapport longueur sur largeur des cotylédons; SFU: surface foliaire de la première feuille unifoliolée; LTH: longueur de la tige principale en hiver; LTP: longueur de la tige principale au printemps; LTF: longueur finale de la tige principale; TEF: longueur sur largeur de l'étendard, TAF: longueur sur largeur de l'aile; TCF: longueur sur largeur de la carène; LEF: longueur des étamines; G05: germination à 05°C; G35: germination à 35°C; TMG: température à maximum de germination

G	TCP	SFU cm ²	LTH —————cm—————	LTP	LTF	TEF	TAF	TCF	LEF mm	G05 ———%———	G35	TMG °C
<u>niveau 2 groupes</u>												
A	1,1	10,8	6,2	11,5	82,5	2,7	5,0	2,0	17,2	48,7	20,8	12,0
B	1,2	8,6	1,0	2,0	5,0	2,6	4,6	2,0	17,8	47,8	33,1	15,7
<u>niveau 4 groupes</u>												
A	1,1	10,8	6,2	11,5	82,5	2,7	5,0	2,0	17,2	48,7	20,8	12,0
B2	1,2	8,9	0,0	0,5	107,5	2,6	4,3	2,0	21,0	96,0	71,1	12,5
C1	1,2	7,4	1,3	1,4	44,3	2,7	4,9	1,9	17,9	42,1	24,3	16,0
C2	1,2	10,0	1,0	2,9	53,2	2,6	4,6	2,1	17,4	41,8	32,2	16,5
<u>niveau 7 groupes</u>												
A1	1,2	10,0	2,3	4,3	48,1	2,8	5,2	2,0	18,8	42,4	23,2	15,0
A2	1,0	12,0	12,0	22,3	134,2	2,5	4,6	2,0	14,8	58,0	17,3	7,5
B2	1,2	8,9	0,0	0,5	107,5	2,6	4,3	2,0	21,0	96,0	71,1	12,5
D1	1,2	8,2	1,0	1,0	41,9	2,4	4,2	2,1	18,1	48,4	27,1	16,7
D2	1,2	6,8	1,4	1,6	48,0	2,8	5,0	1,9	17,3	42,6	26,2	15,0
D3	1,3	9,4	1,3	1,4	31,3	2,7	4,9	2,1	18,1	34,9	34,8	18,3
D4	1,2	10,2	0,9	3,6	62,6	2,6	4,4	2,0	17,1	44,7	31,1	15,7

Les sulla du groupe D3 (S22, S23 et S24) se sont caractérisés par le diamètre des tiges le plus petit (0,5 cm) et le rapport feuilles sur tiges le plus élevé au stade floral (0,9) et supérieur à 2 en hiver (janvier). Ce rapport est assez important vu que la digestibilité d'un fourrage dépend toujours de la masse foliaire. Une variabilité génétique de ce caractère a été observée chez la luzerne (*Medicago sativa* L.) (Julier *et al.*, 1996). Ainsi, l'existence d'une diversité permet de prévoir un progrès possible au cours de la sélection des sallas.

Selon cette dernière classification, le groupe A2 (S3 et S4) ont eu le poids de mille graines le plus important 5,0 g; avec une germination maximum seulement à 7,5°C. Cette température devient de 18°C au sein de D3.

Cette analyse cluster a permis de différencier des groupes de génotypes utiles pour le programme de sélection du sulla local. En effet, selon les critères de sélection programmés, certains groupes comme A2, A1, B2, D2 et D4 représentent une source intéressante de germoplasme formée par les populations S1; S2; S4; S6; S7; S9; S10; S13; et S14 à partir des quelles les meilleures plantes ont été sélectionnées. Pour cela, nous avons établi un index de valeurs des paramètres les plus intéressants qui spécifient les groupes de génotypes sélectionnés (tableau, 24). Ces groupes englobent les génotypes à installation rapide; une surface foliaire, une production hivernale et une hauteur de végétation élevées; un taux de matière sèche au stade floraison supérieur à celui du témoin Sgaravatti; une bonne ramification et un diamètre des tiges convenable.

Tableau 24 Index des principaux paramètres de sélection de *Hedysarum coronarium* L.

Paramètres de sélection analysés	minimum toléré	groupes à intérêt par ordre décroissant: origine des plantes sélectionnées
Hauteur de végétation:		
- hiver (< 15 Janvier)	>= 20 cm	A2, B2, D4, A1 et D3
- printemps (< 15 Avril)	>= 60 cm	A2, B2 et D4
Surface foliaire:		
- 40 j après semis	>= 10 cm ²	A2, A1, D4 et B2
- hiver (< 15 Janvier)	>= 40 cm ²	A2, A1, B2 et D4
- printemps (< 15 Avril)	>= 400 cm ²	A2, B2, D4, D2 et A1
Ramification	>= 5	D2, D1, A1, D4 et A2
Diamètre des tiges	< 1 cm	A1 et D4, D2, D1, et D3
Biomasse sèche:		
- hiver (< 15 Janvier)	>= 100 g/m	A2, A1, D4, D2, D3 et B2
- printemps (< 15 Avril)	> 500 g/m	B2, A2, A1, D4 et D2
Taux de matière sèche:		
(stade bouton floral)	> 16 %	B2, A1 et D4
Rapport feuilles sur tiges:		
(stade bouton floral)	> 0,5	D3, A1 et B2, D4 et A2

Il est évident, que ces caractères ne peuvent tous exister en même temps dans un génotype particulier; mais la sélection essaie de grouper les plantes qui engendrent l'optimum.

2. CREATION VARIETALE ET EVALUATION FOURRAGERE DES GENOTYPES SELECTIONNES DE *Hedysarum coronarium* L.

2. 1. Evaluation de la sélection de *Hedysarum coronarium* L.

En Tunisie, La culture du sulla remonte au début du 20^{ème} siècle. Mais sa place dans les systèmes fourragers n'est pas constante pour plusieurs raisons entre autres l'absence de variété locale sur le marché. L'importation de variétés d'origine étrangère telles que Sgaravatti ou Sparacia a résolu en partie le problème puisque ces dernières ont présenté une certaine adaptation au milieu local (Semadeni, 1976; Ben Emna, 1991; Khriji, 1999). Mais, le fourrage obtenu présente certaines limites comme la faiblesse de son taux de matière sèche.

Vu la diversité des caractères analysés lors de l'évaluation du matériel génétique autochtone, la sélection a été orientée vers des critères fourragers considérés au début prioritaires entre autres, les taux de matière sèche et de protéines brutes au stade floral, la production et la hauteur hivernale des plantes comme indice de précocité variétale, le diamètre des tiges et le rapport feuilles sur tiges au stade floraison.

2. 1. 1. Prévision de la réponse à la sélection

Après 4 cycles de sélection, la prévision de la réponse à la sélection au niveau de la génération F4 formée par 17 génotypes, par rapport à la moyenne des populations d'origine F0, a été déterminée comme suit:

$$\Delta G = i.H.\sigma_p \quad (\text{Gallais, 1990})$$

avec i : intensité de sélection égale à 2,761 qui correspond à un taux de sélection moyen utilisé de 0,75 %; (Falconer, 1981)
 H : héritabilité du caractère étudié; et
 σ_p = écart type phénotypique.

L'héritabilité qui varie d'un caractère à un autre, a été calculée à partir du tableau d'analyse de la variance du paramètre concerné pour l'ensemble des génotypes sélectionnés.

Résultats et discussions: Création variétale et évaluation fourragère des génotypes sélectionnés de Hedysarum coronarium L.

A titre d'exemple, l'héritabilité du paramètre BSH (biomasse sèche hivernale) est de:

$$H = \sigma_g^2 / \sigma_p^2 \text{ (Knapp et al., 1987).}$$

D'après le tableau de l'analyse de la variance, les variances génotypique σ_g^2 et phénotypique σ_p^2 sont de: $\sigma_g^2 = 2,275$ et $\sigma_p^2 = 2,345$

Donc: $H = 0,97$

et $\Delta G = i.H.\sigma_p$
 $= 2,761 \cdot 0,97 \cdot 1,6 = 4,285$ soit 4,3.

Il en résulte que le gain génétique prévue suite à la sélection pour le paramètre est de 4,3 t/ha. En plus, la génération F4 marquerait un gain génétique de 3,9 % pour le taux des protéines brutes (tableau 25).

Tableau 25 Prévision de la réponse moyenne à la sélection des génotypes de sulla après 4 cycles

σ_p : écart type phénotypique; BSH: biomasse sèche de la coupe d'hiver; BSP: biomasse sèche de la coupe au stade floraison; HVH: hauteur de végétation en hiver; LTF: longueur de la tige principale au stade floraison; PBP: protéines brutes au stade floraison; DMO: digestibilité de la matière organique; SFP: surface foliaire au stade floraison; FTP: rapport feuilles sur tiges au stade floraison

Paramètres	unités	σ_p	réponse moyenne attendue à la sélection (ΔG)
BSH	t/ha	1,6	4,3
BSP	t/ha	2,4	6,5
HVH	cm	18,8	51,5
LTF	cm	38,5	43,1
PBP	%	1,5	3,9
D.MO	%	7,2	19,8
SFP	cm ²	557,2	322,1
FTP		0,3	0,8

Cette amélioration serait accompagnée d'un accroissement de la longueur de la tige principale des plantes au stade floral de 43,1 cm.

La régularité et la répartition de la production au cours du cycle biologique demeure désormais l'un des critères de sélection le plus ancien (Prosperi et Genier, 1996). Ce critère prévaut actuellement sur la production annuelle nette de la matière sèche. Pour cela, l'apparition de génotypes à production hivernale importante peut jouer un rôle très important dans la sélection variétale des sullas. Dans ce contexte, la réponse à la sélection des génotypes pour le paramètre production hivernale serait de 4,3 t/ha. Un niveau d'amélioration qui peut être considéré comme très bon surtout que cette amélioration survient en période où la production de fourrage vert est absente dans les systèmes fourragers non irrigués.

La digestibilité de la matière organique laisse attendre une amélioration de 19,8 %. Ce résultat est la conséquence d'une meilleure formation foliaire dont la surface serait accrue de 322,1 cm² par plante au stade floral. Cette prévision encourageante permet de valoriser davantage le germoplasme sulla local afin de l'inclure ultérieurement dans des systèmes fourragers améliorés.

2. 1. 2. Etude du potentiel de production fourragère des génotypes sélectionnés

L'évaluation du potentiel productif des sullas après 4 cycles de sélection phénotypique demi-frères à partir de 27 populations spontanées, classe le sulla témoin (T) parmi les derniers génotypes avec un rendement moyen en matière sèche de 6,8 t/ha au stade floraison. Cette production représente moins que la moitié de certains sullas locaux (figure 29). Dans les mêmes conditions, S1L1 et S7L7 ont fourni 14 t/ha. Ce rendement du sulla Sgaravatti a été confirmé par Restucia (1975) et Ben Emna (1991), lors d'une exploitation printanière en Tunisie.

En général, la croissance du sulla ne devient importante qu'à partir de la deuxième quinzaine du mois de mars pour aboutir au maximum de son potentiel productif au stade floraison, considéré comme idéal pour la coupe d'un sulla de première année. Cette production est donc élaborée en un temps relativement court. Une phytomasse de 14 t/ha de matière sèche comme celle produite par le sulla S1L1 pourrait être sujette à des pertes quantitatives et qualitatives en pleins champs. Surtout que la majorité des agriculteurs en Tunisie ne disposent pas de matériel adéquat comme par exemple une faucheuse conditionneuse qui permet de faner rapidement la verdure et de la conserver ultérieurement par voie sèche ou humide.

Pour cela, la production hivernale est prise en considération dans les critères de sélection afin que la production totale du sulla soit mieux répartie dans le temps. Une production échelonnée et bien répartie entre le mois de janvier et avril permet de mieux valoriser le potentiel productif de la plante. Ceci permet d'éviter toute perte possible de fourrage par le sulla qui n'a pas pu être coupé en hiver.

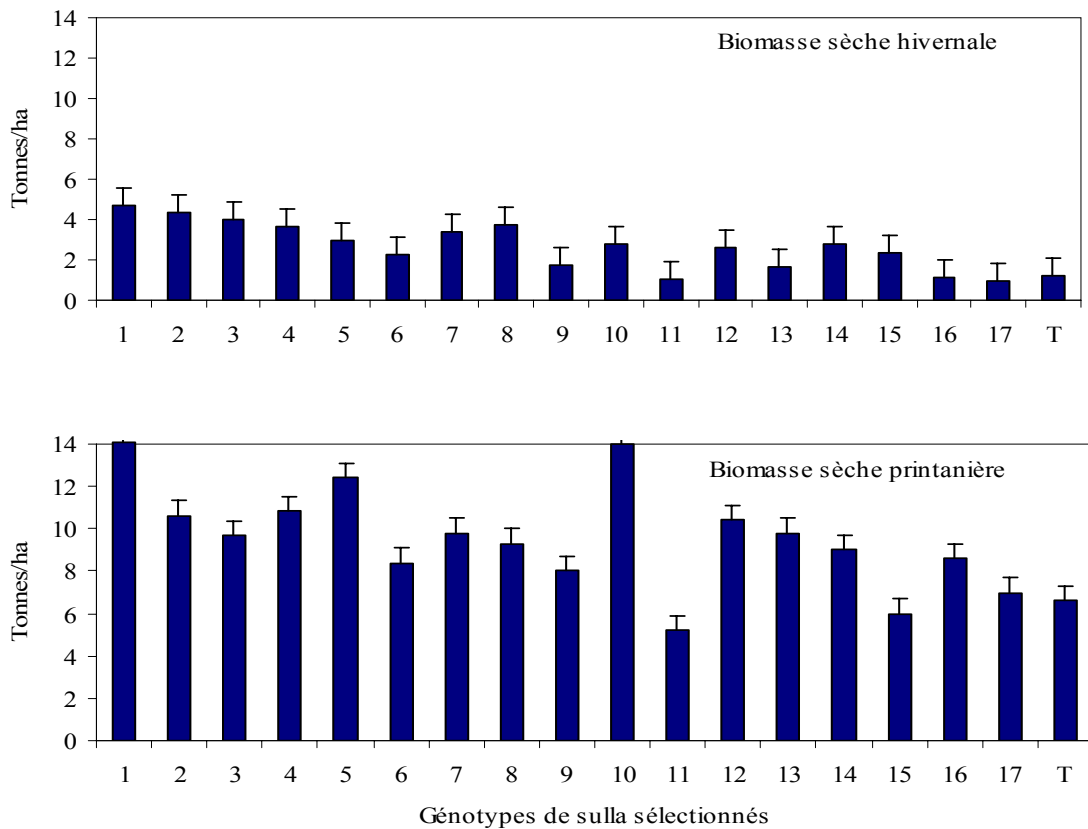


Figure 29 Distribution des biomasses sèches hivernale (janvier) et printanière (avril) des sullas après 4 cycles de sélection en comparaison avec le témoin T (Sgaravatti)
 1: S1L1; 2: S1L6; 3: S1L10; 4: S4L3; 5: S4L10; 6: S6L2; 7: S13L2; 8: S9L1; 9: S4L5; 10: S7L7; 11: S10L4; 12: S14L6; 13: S9L2; 14: S2L1; 15: S13L9; 16: S2L11; 17: S4L4; T: Sgaravatti

La production en matière sèche hivernale au cours du mois de janvier des sullas S1L1, S1L6 et S1L10 a dépassé 4 t/ha alors que celle de Sgaravatti a été de 1,2 t/ha. Par rapport à la moyenne génotypique des sullas locaux, Sgaravatti avait produit respectivement moins de 56 et 31 % des biomasses hivernale et printanière. Ce résultat prouve l'importance de l'origine géographique du germoplasme dans une sélection qui vise l'amélioration des ressources phytogénétiques locales.

2. 1. 3. Etude de la surface foliaire des géotypes sélectionnés

Le développement d'une surface foliaire abondante engendre ultérieurement des avantages aussi bien au niveau de la production en matière sèche que la qualité du fourrage qui devient plus riche en feuilles donc plus digestible.

Tableau 26 Surfaces foliaires hivernale et printanière des géotypes de sulla après 4 cycles de sélection en comparaison avec Sgaravatti
Les valeurs suivies par la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil 5 %

Sulla sélectionnés	Surface foliaire (cm ² /plante)	
	hivernale	printanière
S1L1	592,0 a	1725,1 a
S1L6	563,6 ab	1649,6 a
S1L10	561,7 ab	1743,4 a
S4L3	453,9 d	1355,4 b
S4L10	356,5 f	1046,9 de
S6L2	376,3 f	1320,1 bc
S13L2	464,3 d	1167,7 cd
S9L1	525,2 bc	1302,4 b
S4L5	278,8 g	741,0 f
S7L7	436,2 e	1751,9 a
S10L4	245,8 h	1032,5 de
S14L6	358,8 f	918,8 e
S9L2	338,7 f	1230,2 bc
S2L1	375,0 f	914,2 e
S13L9	497,9 cd	1389,9 b
S2L11	186,4 hi	614,7 f
S4L4	163,6 i	887,0 e
Moyenne	398,5	1222,9
Sgaravatti	163,4 i	225,5 bc
LSD 5%	59,2	175,1

En général, la production hivernale du sulla Sgaravatti a été moins fournie en feuilles. En cette période de l'année et comparé à tous les géotypes locaux, Sgaravatti avait produit des plantes ayant une surface foliaire réduite de 235,1 cm²/plante. Cet écart a été anéanti au printemps (tableau, 26). Malgré une bonne surface foliaire obtenue par le sulla Sgaravatti au stade floraison (1225,5 cm²/plante), il s'est trouvé significativement dépassé par certains géotypes comme S1L1, S1L6, S1L10 et S7L7 d'au moins 424,1 cm²/plante.

Seuls les géotypes S1L1, S1L6 et S1L10 descendants de la même population de sulla S1 se sont trouvés les meilleurs du point de vue surface foliaire aussi bien en hiver qu'au printemps. Cette stabilité pourrait être un indice de bonne adaptation de ces sullas au milieu de la sélection. D'autres géotypes comme S7L7 avaient donné des plantes à surface foliaire beaucoup plus élevées au printemps (1751,9 cm²/plante) qu'en hiver (436,2 cm²/plante). Ce comportement pourrait être lié au facteur précocité du géotype.

2. 1. 4. L'architecture des plantes

L'architecture ou port des plantes est une caractéristique qui permet de prévoir la vocation future de la culture (pâturée ou coupée). De ce fait, il est intéressant de présenter en même temps d'autres paramètres comme le taux de matière sèche à la floraison, le diamètre des tiges et la ramification des plantes. Les géotypes ayant des tiges relativement grosses (diamètre >1 cm) et un taux de matière sèche supérieur à 20 % comme S1L1, S1L6 et S2L11 se conserveraient très bien par ensilage (tableau 27). En plus, ces géotypes à port érigé s'adaptent mieux que les plagiotropes à une coupe mécanique

Tableau 27 Quelques caractéristiques liés au port de la plante des géotypes du sulla après 4 cycles de sélection en comparaison avec Sgaravatti
SO: strictement orthotrope; O: orthotrope; M: mixte; SP: strictement plagiotrope; P: plagiotrope; MS: matière sèche; Ø: diamètre
Les valeurs suivies par la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil 5 %

Sullas sélectionnés	MS (%)	Ø des tiges (cm) stade floral	ramification	port
S1L1	25,4 a	1,9 a	5 cde	SO
S1L6	25,9 a	1,7 ab	2 e	SO
S1L10	25,0 a	0,8 cde	6 cde	SO
S4L3	18,5 bcde	1,0 c	3 e	M
S4L10	18,0 bcde	0,6 de	2 e	M
S6L2	16,3 d	0,6 e	18 ab	O
S13L2	16,1 de	0,6 e	12 bc	O
S9L1	13,5 e	0,7 de	14 b	O
S4L5	18,3 bcde	0,8 cde	3 de	M
S7L7	18,5 bcde	0,9 cd	17 ab	SO
S10L4	16,7 cde	0,6 e	19 a	SP
S14L6	16,1 de	0,8 cde	21 a	M
S9L2	13,0 e	0,8 de	8 c	P
S2L1	15,9 de	1,6 b	4 cd	P
S13L9	14,6 e	0,5 e	14 b	P
S2L11	20,5 bc	1,6 ab	5 cde	O
S4L4	18,6 bcde	0,8 cde	5 cde	M
Moyenne	18,3	0,9	9,3	-
Sgaravatti	14,6 e	1,6 b	4 cde	O
LSD 5%	3,5	0,3	4	

Les génotypes locaux se sont caractérisés par des tiges de plus faible diamètre (0,9 cm) que le sulla Sgaravatti (1,6 cm). En plus, ce dernier avait produit un fourrage à très faible taux de matière sèche (14,6 %) contre 18,3 % comme moyenne de tous les génotypes sélectionnés. Ce résultat est l'une des contraintes qu'a fait que le sulla Sgaravatti n'a pas pu jusqu'à maintenant occuper de grandes surfaces dans les systèmes fourragers. Le niveau de ramification permet à la plante de mieux supporter la charge et la dent des animaux. Les génotypes strictement plagiotropes comme S10L4 et caractérisés par un nombre de 19 rameaux/plante et un petit diamètre (0,6 cm) seraient par conséquent les mieux adaptés au pâturage. De même, la plagiotropie des plantes est un caractère très important pour la fixation des sols dans les ouvrages de CES (conservation des eaux et des sols). En région montagneuse, Slim (2004) a montré que l'espèce *Hedysarum coronarium* L. peut réduire la quantité d'eau ruisselée de 60 fois par rapport à un blé dur (*Triticum durum* Desf.). Ainsi, les sullas très ramifiés comme S6L2, S9L1, S10L4, S13L2, S13L9 et S14L6 seraient de bonnes candidates pour la protection des sols en pente.

2. 1. 5. La valeur nutritive des génotypes sélectionnés

L'appréciation de la valeur nutritive des divers sullas sélectionnés a été faite en hiver (janvier) et au printemps (stade floraison). Pour cela, nous avons pris comme repère la précocité qui détermine le période de floraison de chaque génotype (figure 30).

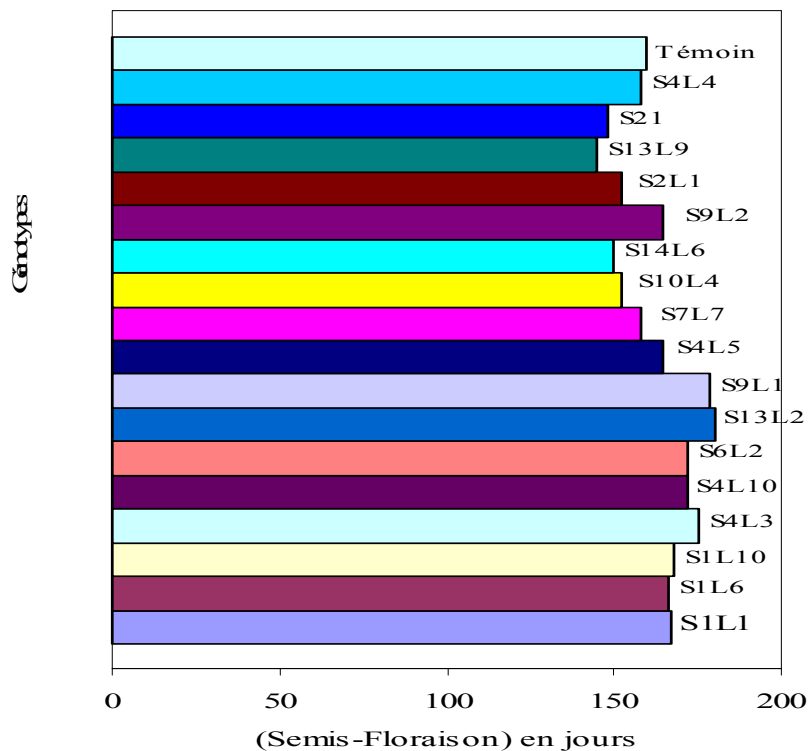


Figure 30 Durée en jours de la période semis- floraison des sullas

La valeur nutritive des sullas a été évaluée sous forme de protéines brutes, matière organique digestible, cellulose brute et minéraux totaux. Une différence significative d'un géotype et d'un stade de coupe à l'autre a été trouvée. Ainsi, pour une exploitation type hiver (janvier), les taux de protéines brutes ont varié de 16,5 % pour S2L11 à 22,7 % de la matière sèche avec le sulla S10L4 (tableau 28). Ces valeurs ont chuté différemment avec le vieillissement de la plante.

Tableau 28 Evaluation de quelques paramètres indicatifs de la valeur nutritive du sulla après 4 cycles de sélection en comparaison avec Sgaravatti
 PBH et PBP: protéines brutes en % de la matière sèche respectivement pour des coupes hivernale et printanière, CBH et CBP: cellulose brute en % de la matière sèche respectivement pour des coupes hivernale et printanière, MMH et MMP: matière minérale en % de la matière sèche respectivement pour des coupes hivernale et printanière, MODH et MODP: matière organique digestible respectivement pour des coupes hivernale et printanière, MS: matière sèche

Géotypes Sélectionnés	PBH	PBP	CBH	CBP	%MS		MMH	MMP
					MODH	MODP		
S1L1	18,5j	15,5bcd	20,1a	23,2de	79,4h	80,1c	14,5d	13,2c
S1L6	18,6j	15,3d	18,3d	19,1g	78,8i	81,9b	14,7cd	13,6b
S1L10	20,9e	19,0a	17,7e	17,8h	80,8g	82,4a	14,9c	13,2c
S4L3	19,8h	16,4bd	18,1d	19,5g	80,5g	77,0f	13,7fg	11,9e
S4L10	19,2i	15,9bc	19,0b	22,7e	79,4h	71,2k	13,6g	11,6f
S6L2	21,3d	13,1e	17,0f	24,5b	82,7e	67,0m	13,6g	10,5h
S13L2	21,9bc	15,0d	17,7e	25,8ab	82,0f	64,1q	13,9f	10,5h
S9L1	21,7c	15,0d	16,3g	25,2b	83,1d	72,9i	13,2ij	11,8ef
S4L5	20,1gh	14,5e	19,4b	20,8f	79,2h	74,1h	14,3e	10,9g
S7L7	22,2b	15,5cd	17,5e	21,3f	86,6a	78,7e	13,5gh	09,9j
S10L4	22,7a	15,1d	15,0h	24,7b	85,5b	67,6l	14,7cd	12,2d
S14L6	20,1gf	17,0c	16,6g	19,2g	82,9d	75,7g	13,0j	10,2i
S9L2	21,6cd	17,1b	18,1d	19,9g	82,4e	79,4d	13,4hi	11,8ef
S2L1	21,8c	18,0ab	18,7c	24,3c	79,4h	65,5o	15,8a	11,1g
S13L9	20,5f	15,2cd	17,2f	22,9e	78,5i	66,3n	15,5b	14,8a
S2L11	16,5k	15,5c	18,2d	26,4a	84,5c	64,5pq	14,6d	12,2d
S4L4	20,3fg	15,5c	15,1h	23,0de	86,4a	71,7j	14,7cd	12,1d
Moyenne	20,4	15,8	17,6	22,3	81,9	72,9	14,2	11,8
Sgaravatti	21,3d	14,6de	19,1b	23,8cd	79,1g	64,7p	14,9c	10,9g
LSD 5 %	0,3	1,6	0,3	0,8	0,3	0,4	0,2	0,2

Cependant, au stade floraison la perte progressive du feuillage fait que la matière azotée totale de la plante tend à la baisse. D'un stade à l'autre, la perte de points a varié de 3 % (S1L1) à 8,2 % (S6L2). Le sulla Sgaravatti est considéré parmi les génotypes qui a le plus réduit son taux de protéine brute (-6,7 %).

Le facteur digestibilité dépend aussi bien de la structure du fourrage (proportion des feuilles) que du milieu naturel (la température). Nelson et Moser (1994) ont montré qu'une augmentation de la température accélère et intensifie la lignification des parois cellulaires, ce qui entraîne une diminution plus rapide de la digestibilité du fourrage. Même au stade feuillu des différences entre espèces ont été trouvées (Marten, 1985) et entre divers génotypes de sulla du nord (Ben Jeddi *et al.*, 1998). Avec certains sullas, la matière organique digestible demeure significativement invariable entre les coupes d'hiver et du printemps. Dans ce cas, la perte de points ne dépasse pas 3 %, contrairement à d'autres sullas comme S2L11 où la perte de digestibilité a dépassé 20 %. La matière organique digestible du témoin Sgaravatti a chuté de 79,1 à 64,7 % au stade floral. Cette baisse est moins importante pour la moyenne des génotypes locaux (tableau 28).

Le taux de matière organique digestible est influencé par la teneur du fourrage en cellulose brute. Cette dernière, n'évolue pas de la même manière entre les sullas. Du stade hivernal à la floraison, la cellulose brute dans le fourrage a augmenté de 0,1 % (S1L10) à 9,7 % (S10L4). La prise en considération de cette variabilité intervient lors du choix de la période de coupe. Les sullas qui perdent facilement leur valeur nutritive se prêtent mieux à une coupe précoce (avant la floraison) comme c'est le cas de S13L2, S7L7 et Sgaravatti. Alors que d'autres génotypes comme S1L10 et S9L2 peuvent être fauchés même à un stade de floraison avancée.

2. 1. 6. Conclusion

La récapitulation de toutes les données quantitatives et qualitatives caractérisant les génotypes de la génération F4 du sulla du nord a montré qu'un génotype donné ne peut pas être meilleur partout. Cependant, une exception a été constaté au niveau du génotype S1L10. Ce dernier s'est caractérisé par l'une des meilleures surfaces foliaires hivernale et printanière respectivement 561,7 et 1743,4 cm²/plante et une bonne production hivernale (4 t/ha), il a préservé une bonne classification en ayant des teneurs en PBP de 19 %, CBP de 17,8 % et MODP de 82,4 % ; avec un diamètre de tiges inférieur à 1 cm. En conséquent, ce génotype pourrait avoir un rôle à jouer dans l'amélioration de la production fourragère en Tunisie.

Le sulla S7L7 qui avait produit la plus grande quantité de fourrage au stade floral avec S1L1 (14 t/ha de MS) n'était pas aussi bon partout.

Les sillas les plus ramifiées n'ont pas été les meilleurs producteurs de fourrage. Les géotypes S1L10 et S7L7 peuvent être considérés complémentaires car les deux ont été classés comme de très bons producteurs de fourrage sauf que leur ramification a été différente respectivement 6 et 17 rameaux. De plus, ces deux sillas ont eu des taux de matière sèche différents 25 et 18,5 % au stade floral. Cette complémentarité a été de même trouvée entre S10L4 et S14L6 dont l'un est plagiotrope avec une production relativement faible (5,2 t/ha de MS) et l'autre est mixte avec une meilleure production (10,4 t/ha de MS). Cette différence est souvent recherchée en production fourragère dans la mesure où des mélanges de géotypes sont possibles afin de constituer des prairies ayant une meilleure souplesse d'exploitation.

2. 2. Effet de la salinité et de la sécheresse simulée sur la germination des géotypes sélectionnés de *Hedysarum coronarium* L.

La germination des semences est le principal facteur limitant l'installation des cultures sous des conditions de tension saline. Au cours du cycle biologique de la plante, la tolérance au sel varie d'un stade à l'autre. Généralement, le stade germinatif est considéré comme étant le plus sensible au sel (Catalan *et al.*, 1994). En effet, la salinité affecte la germination des graines soit par la création d'un potentiel osmotique bloquant l'absorption de l'eau soit par l'effet toxique des ions sodium et chlorure (Poljakoff-Mayber *et al.*, 1994).

De même, en régions méditerranéennes, les conjonctions climatiques automnales favorables à la germination et à l'installation des espèces fourragères sont souvent imprévisibles. Neffati *et al.* (1993) ont montré que les plantes des régions arides se raréfient rapidement en raison des conditions climatiques de plus en plus irrégulières pour leur germination. Cette situation contribue encore au développement de l'érosion génétique.

2. 2. 1. Etude de la germination en milieu de stress salin

Quoi que le sulla du nord (*Hedysarum coronarium* L.) soit une espèce glycophyte, une variation de tolérance au sel a été observée entre les divers géotypes (figure 31). Au stade adulte, le sulla du nord commence à manifester des signes de stress à partir de 3 g/l (Rahmani, 1991). Contrairement à la partie aérienne, les racines supportent plus le sel (Munns et Termaat, 1986).

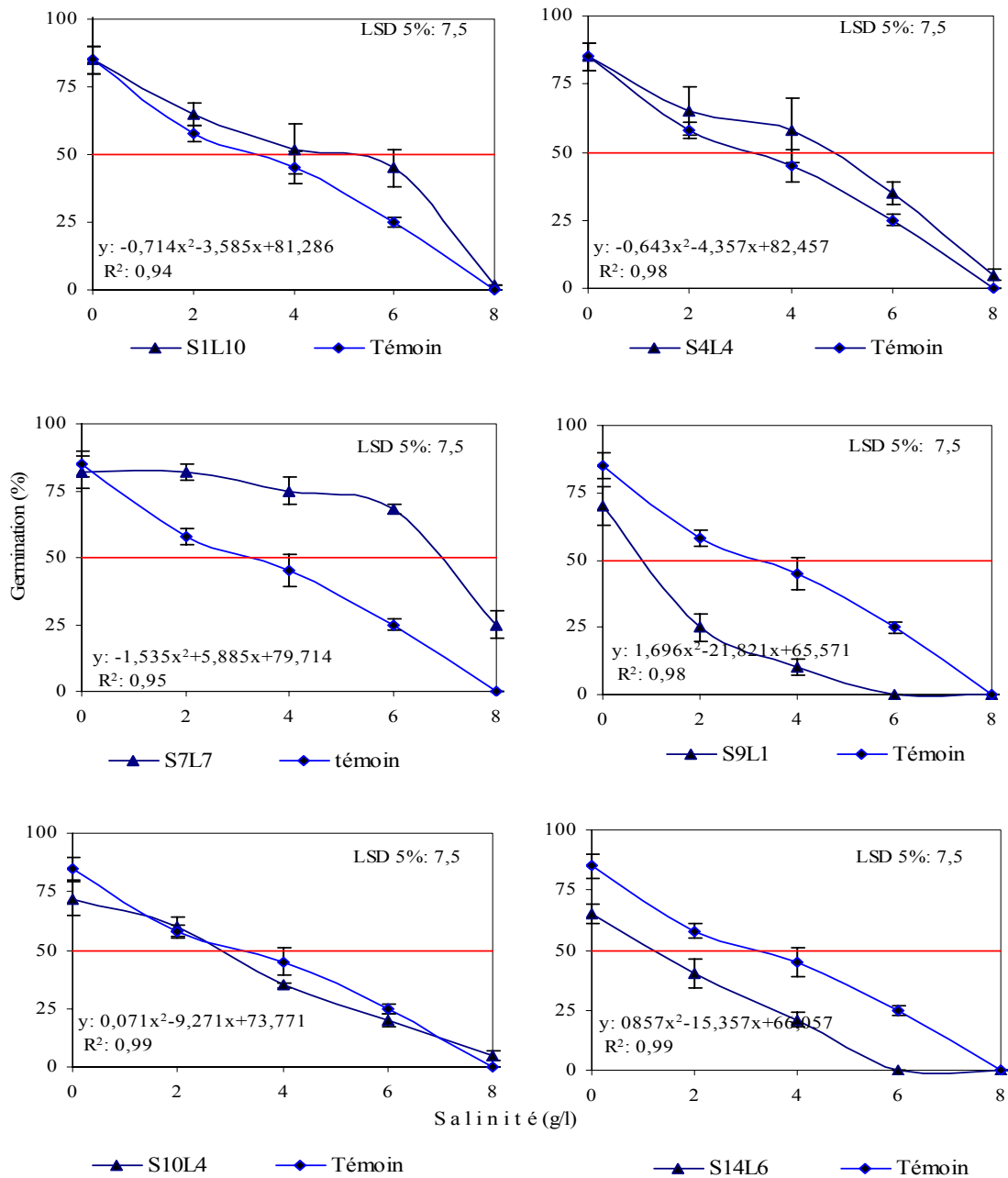


Figure 31 Evolution de la germination des génotypes sélectionnés du sulla du nord en fonction de la salinité du milieu

La présence de sel (NaCl) dans le milieu germinatif tend à réduire significativement le nombre de graines germées. A partir de 2 g/l, les taux de réduction de la germination ont varié de 24 à 76 % respectivement pour les sallas S4L4 et S9L1. Alors que la dose 8 g/l a été fatale pour la majorité des génotypes sauf S7L7 et S4L4 qui ont gardé respectivement une capacité germinative de 20 et 6,7 % (figure 31).

La tolérance au sel des sullas a été comparée sur la base aussi bien de la germination finale que du facteur DL_{50} qui inhibe la germination finale de 50 % de sa valeur dans les conditions normales (Rehman *et al.*, 1997). Cette germination finale peut ne pas être 100 %. A titre d'exemple, dans les conditions normales, la germination finale de S1L10 a été de 85 % donc son DL_{50} est de à 42,5 % de germination. Alors que, la germination de 50 % indiquée par une droite dans la figure 31 permet de calculer les doses de sel correspondantes qui représentent un paramètre dit DG_{50} . Ceci nous renseigne sur une situation du milieu physique dans lequel nous obtenons 50 % de germination indépendamment de la germination finale du lot. Dans certains cas, la germination finale du lot n'atteint jamais la valeur de 50 % pour une raison quelconque (lot de semences mal conservé). Dans cette situation, seul le DL_{50} peut être déterminé.

En général, les deux paramètres DL_{50} et DG_{50} sont complémentaires car ils montrent le degré de tolérance des divers géotypes dans des milieux particuliers (tableau 29). La détermination de ces paramètres à partir de l'évolution de la germination a montré une différence de tolérance au sel très variable d'un géotype à l'autre. Le sulla Sgaravatti s'est trouvé en position intermédiaire avec un DG_{50} de 3,3 g/l et un DL_{50} de 4,2 g/l. Ce seuil de tolérance a été légèrement supérieur à celui de la croissance de la partie aérienne de l'ordre de 3 g/l (Rahmani, 1991). Parmi les sullas sélectionnés, deux géotypes se montrent très sensibles au sel. Il s'agit de S9L1 et S14L6 qui avaient respectivement des DL_{50} de 1,3 et 2,5 g/l. Alors que, le géotype S7L7 a gardé une germination supérieure à 60 % jusqu'à 6 g/l. Le DL_{50} de ce sulla est de 7,5 g/l. Ce seuil classe S7L7 comme le sulla le plus tolérant au sel. De même, S1L10 et S4L4 peuvent être classés comme des sullas tolérants le sel au stade germinatif vu des DL_{50} élevés qui sont respectivement de 6,1 et 5,3 g/l. Le sulla S10L4 s'est comporté comme Sgaravatti avec un DL_{50} de 3,8 g/l.

Tableau 29 Appréciation des paramètres de tolérance au sel DL_{50} et DG_{50} de quelques géotypes sélectionnés du sulla du nord au stade germinatif

Géotypes sélectionnés	DL_{50}	DG_{50}
	(g/l de NaCl)	
S1L10	6,1	5,0
S4L4	5,3	4,8
S7L7	7,5	7,0
S9L1	1,3	0,9
S10L4	3,8	2,8
S14L6	2,5	1,2
Sgaravatti	4,2	3,3

La variation de tolérance au stress salin est souvent étudiée pour montrer une différence de comportement des espèces entre leurs stades de développement (Lovato *et al.*, 1994). Ceci est d'autant plus intéressant que si la différence de tolérance devient de type intra-spécifique. En effet, l'existence d'une diversité de tolérance à un stress comme le sel au sein d'une même espèce est un moyen pour l'amélioration des systèmes de culture en zones marginales peu favorables.

La valorisation de cette diversité génotypique du sulla liée à la tolérance au sel au stade germinatif permet au sélectionneur de mettre au point un matériel génétique tolérant cette contrainte assez fréquente en Tunisie et qui se trouve souvent associée au stress hydrique.

Il est à signaler que certaines espèces peuvent mieux se développer sur des milieux ayant une concentration saline supérieure à celle de leur germination (Smaoui et Cherif, 1986); alors que d'autres germent mieux à des salinités plus élevées. Quoique Waisel (1972) a montré que la réponse des graines à la salinité est un bon indicateur de la tolérance au sel de la plante pour les stades biologiques ultérieurs.

2. 2. 2. Etude de la germination en milieux de stress hydrique

L'installation rapide des espèces dans des conditions de stress hydrique est considérée comme un critère de sélection génotypique dans les régions semi-arides à pluviosité automnale aléatoire. A une pression osmotique de -7 bars, seul le sulla S7L7 a continué à germer avec une capacité germinative de 25 %. La germination du témoin Sgaravatti est passée de 85 à 25 % entre 0 et -1 bars (figure 32), son DL_{50} est de $-0,8$ bars. Ce génotype s'est classé comme le plus sensible au stress hydrique. En se basant aussi bien sur la germination finale que les DG_{50} et DL_{50} des sallas sélectionnés; S14L6 possède la germination la moins touchée par la sécheresse avec un DG_{50} de $-3,0$ bars et un DL_{50} de $-4,4$ bars. Les sallas S10L4 et S7L7 avaient des DG_{50} de $-2,0$ bars alors que les DL_{50} sont respectivement de $-3,0$ et $-3,5$ bars. Au stade germinatif, S1L10 et le témoin se sont comportés comme les plus sensibles à un déficit hydrique avec un DL_{50} inférieur à -1 bar (tableau, 30).

Résultats et discussions: *Création variétale et évaluation fourragère des géotypes sélectionnés de Hedysarum coronarium L.*

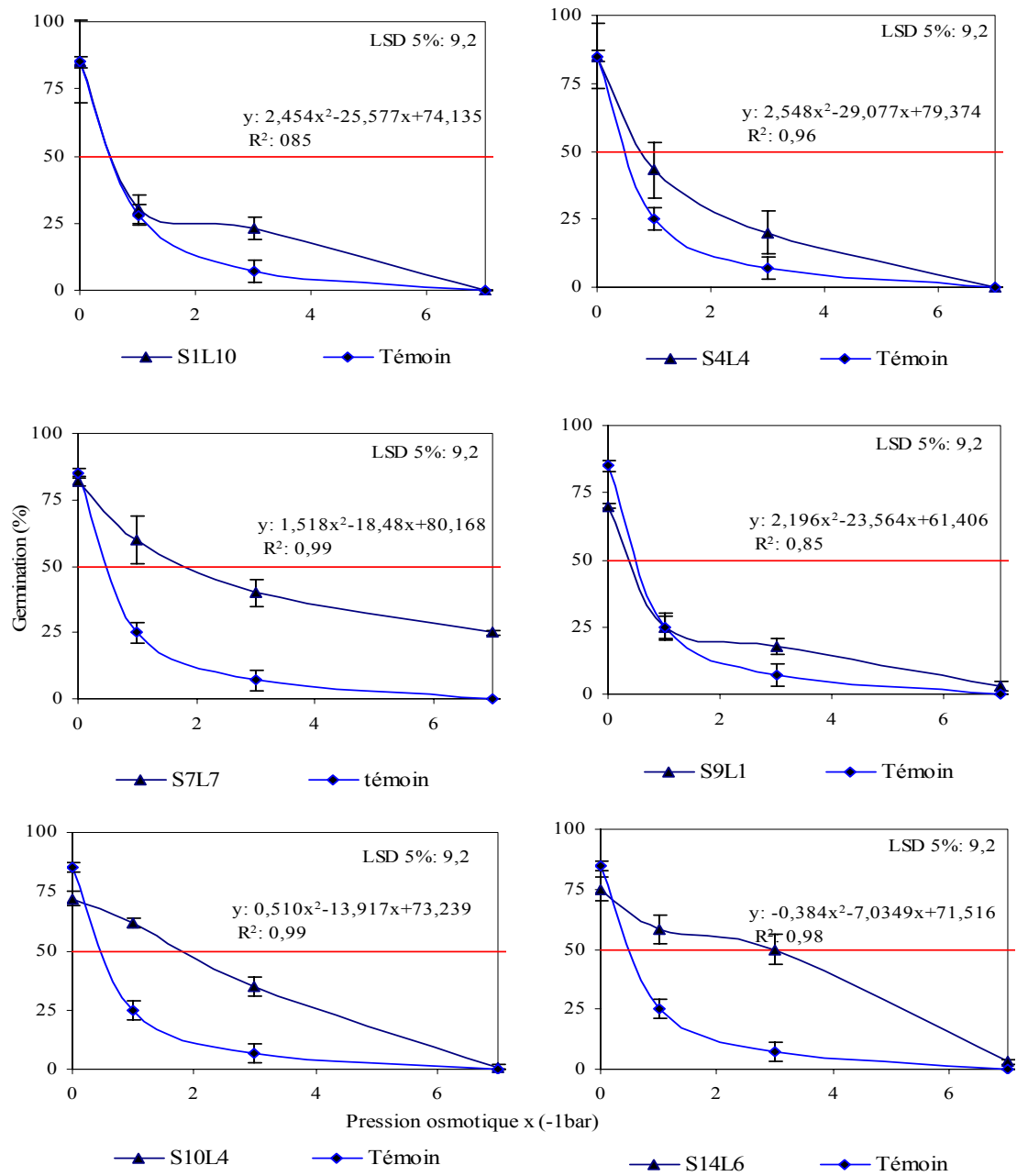


Figure 32 Evolution de la germination des géotypes sélectionnés du sulla du nord en fonction d'une sécheresse simulée

Tableau 30 Evaluation des paramètres de tolérance à un stress hydrique simulé DL₅₀ et DG₅₀ de quelques géotypes sélectionnés du sulla du nord au stade germinatif

Géotypes sélectionnés	DL ₅₀	DG ₅₀
	bars	
S1L10	-0,8	-0,5
S4L4	-1,5	-1,0
S7L7	-3,5	-2,0
S9L1	-0,8	-0,5
S10L4	-3,0	-2,0
S14L6	-4,4	-3,0
Sgaravatti	-0,8	-0,5

Le testage de la germination des sullas sous diverses conditions de stress salin et hydrique a montré qu'il n'existe pas de lien parfait entre les degrés de sensibilité du sulla à ces contraintes naturelles. Certains géotypes comme S1L10 a toléré mieux les conditions salines que la sécheresse (tableau, 31). Le sulla S7L7 a été le seul géotype qui a bien supporté les deux types de stress abiotiques.

Tableau 31 Estimation de la tolérance des géotypes sélectionnés du sulla du nord aux stress hydrique et salin au stade germinatif en comparaison avec Sgaravatti

Géotypes	tolérance	
	stress salin	stress hydrique
S1L10	bonne	mauvaise
S4L4	bonne	mauvaise
S7L7	très bonne	bonne
S9L1	mauvaise	mauvaise
S10L4	moyenne	bonne
S14L6	moyenne	très bonne
Sgaravatti	bonne	mauvaise

L'étude de la réaction des sullas vis à vis de la salinité et de la sécheresse simulée au stade germinatif, a montré que le maximum de germination obtenu en condition de stress salin (2 g/l) est dans la majorité des cas supérieur au maximum en milieu de stress hydrique (-1 bar). Cette situation a été discutée par plusieurs auteurs (Perez-Alfocea *et al.*, 1993; Mansour, 1994), pour montrer que l'effet de toxicité supplémentaire provoquée par le sel n'est pas totalement vérifié pour l'espèce sulla. L'effet du sel sur la germination des graines des sullas serait le résultat d'une action osmotique interne ou une toxicité ionique plutôt qu'une action osmotique externe due à la solution saline

2. 3. Comportement fourrager de quelques géotypes sélectionnés de *Hedysarum coronarium L.* dans deux bioclimats différents

2. 3. 1. Evaluation du potentiel productif

2. 3. 1. 1. Première année de production

L'étude de la production en biomasse sèche des sullas sélectionnés dans deux sites (Tunis-INAT et Mateur), a montré une variabilité génotypique importante. Le sulla S7L7 s'est distingué par le plus haut rendement moyen des deux sites (10,8 t/ha). Alors que S9L1, S14L6 ainsi que Sgaravatti se sont caractérisés par des rendements plus faibles respectivement 4,4; 5,7 et 5,3 t/ha (tableau 32).

Tableau 32 Potentiel de production en matière sèche au stade floral (t/ha), du sulla local amélioré de première année en comparaison avec Sgaravatti dans les sites de Tunis-INAT et Mateur
Les moyennes suivies par la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil 5 %

Géotypes	Tunis	Mateur t/ha	Moyenne
S1L10	4,8 b	9,2 b	7,0 b
S4L4	4,8 b	8,0 cd	6,4 bc
S7L7	9,2 a	12,5 a	10,8 a
S9L1	2,4 c	6,5 e	4,4 f
S10L4	5,2 b	7,1 ed	6,1 cd
S14L6	2,8 c	8,5 bc	5,6 ed
Moyenne	4,8	8,6	6,7
Sgaravatti	1,1 d	9,5 b	5,3 e
LSD 5%	1,15	1,05	0,75

A Mateur, le rendement moyen de la matière sèche de tous les géotypes confondus a été nettement plus élevé que celui de Tunis, respectivement 8,6 et 4,8 t/ha. Les conditions climatiques du mois de février (période de ramification et d'élongation du sulla), étaient meilleures à Mateur où il a plu 68,9 mm contre 32 mm à Tunis. De plus, le sol de Mateur est plus riche en matière organique 2,08 % contre 1,4 % à Tunis-INAT. Ceci procure au sol une meilleure capacité de rétention d'eau. Dans ces conditions, les plantes étaient moins exposées à l'effet de dessèchement du sol.

A Tunis, la croissance de Sgaravatti a été la plus déprimée en produisant la plus faible biomasse sèche printanière de l'ordre de 1,1 t/ha (tableau 32). L'origine géographique de ce sulla a eu un effet significatif sur l'expression de son rendement en milieu semi-aride.

Par contre, la tolérance de S7L7 à des conditions de stress hydrique aussi bien au stade germinatif que durant son développement ultérieur a fait que ce génotype produisait une quantité de matière sèche significativement plus importante que les autres sullas (9,2 t/ha).

Cette différence de production fourragère des génotypes de sulla entre des sites bioclimatiques différents permet de caractériser davantage le matériel génétique sélectionné pour une utilisation durable dans les systèmes fourragers.

2. 3. 1. 2. Deuxième année de production

En deuxième année de culture des sullas, le démarrage de la végétation a eu lieu juste après les premières pluies du mois de septembre qui étaient encore plus importantes à Mateur. Dans cette station et au mois de novembre, la hauteur de végétation des sullas a varié de 40 à 63 cm.

En deuxième année, le sulla Sgaravatti a produit 69 % de moins à Tunis qu'à Mateur. Dans ces conditions, le génotype S7L7 a été le moins affecté par cette différence de rendement avec 27 % de moins à Tunis (tableau, 33)

Tableau 33 Production de la matière sèche (t/ha) moyenne des deux sites Tunis-INAT et Mateur du sulla local amélioré en comparaison avec Sgaravatti au cours de la deuxième année de culture
Les moyennes suivies par la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil 5 %

Génotypes	Tunis	Mateur t/ha	Moyenne
S1L10	9,0 a	13,3 a	11,1 a
S4L4	5,7 c	11,2 bcd	8,3 c
S7L7	8,3 b	12,8 ab	11,0 a
S9L1	4,7 c	10,5 cd	7,6 c
S10L4	9,8 a	9,6 d	9,7 b
S14L6	6,0 c	10,0 d	8,0 c
Moyenne	7,2	11,2	9,2
Sgaravatti	3,7 d	12,2 abc	7,9 c
LSD 5%	1,8	2,0	1,3

L'effet site a été hautement significatif et a affecté surtout la production de la première coupe (figure, 33). La précocité de la végétation dans le site de Mateur a fait que la première coupe a démarré plutôt (40 jours avant la première coupe de Tunis).

La différence de dates de la première coupe était à l'origine du manque des pluies enregistrées à Tunis au moment du démarrage de la végétation du sulla (septembre-octobre).

Le sulla Sgaravatti n'a exprimé parfaitement son potentiel de production que dans les conditions naturelles de Mateur. Ceci montre bien sa limite d'adaptation à des conditions climatiques aléatoires. Dans le semi-aride, tous les génotypes locaux avaient produit significativement plus de biomasse sèche que le témoin Sgaravatti (figure 33).

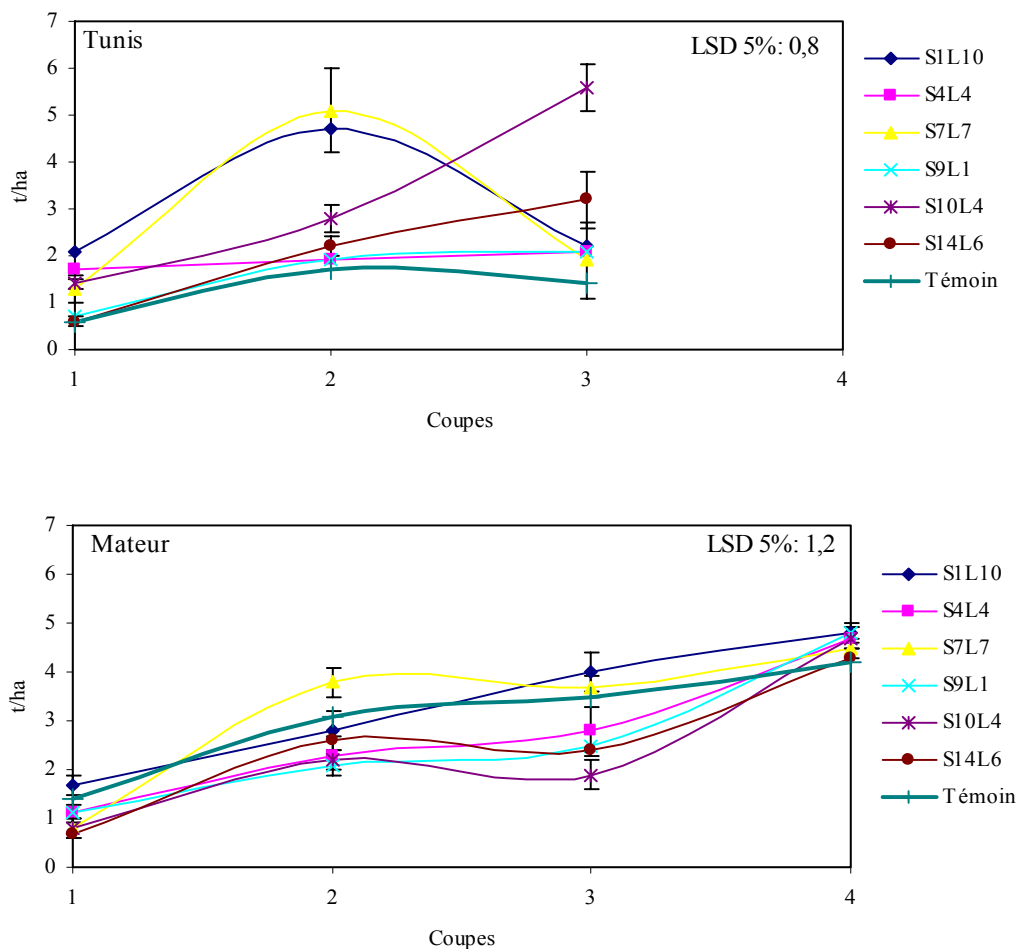


Figure 33 Variation selon les coupes du potentiel productif en matière sèche des génotypes du sulla local amélioré de deuxième année dans les deux sites expérimentaux Tunis-INAT et Mateur en comparaison avec le témoin Sgaravatti

Le total des coupes de deux années consécutives de production des sullas a enregistré un pic de 25,3 t/ha de matière sèche pour le génotype S7L7 dans le site de Mateur. Ce niveau de production a baissé relativement à Tunis pour atteindre 17,5 t/ha (tableau 34).

Tableau 34 Production totale (1^{ère} et 2^{ème} année) de la matière sèche (t/ha) des deux sites Tunis-INAT et Mateur du sulla local amélioré en comparaison avec le témoin Sgaravatti
Les moyennes suivies par la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil 5%

Génotypes	Tunis	Mateur t/ha	Moyenne
S1L10	13,8 ab	22,5 b	18,1 b
S4L4	10,5 bc	19,2 c	14,8 cd
S7L7	17,5 a	25,3 a	21,4 a
S9L1	7,1 cd	17,0 cd	12,0 e
S10L4	15,0 a	16,7 d	15,8 c
S14L6	8,8 cd	18,5 cd	13,6 cde
Moyenne	12,1	19,8	16,9
Sgaravatti	4,8 d	21,7 b	13,2 ed
LSD 5%	4,0	2,1	2,2

Dans le semi-aride, les sullas locaux avaient produit 60 % de plus de fourrage que Sgaravatti. Ce résultat est très important lors du choix des variétés dans les systèmes fourragers des régions à pluviosité aléatoire. La différence de rendements s'est affaïssé sensiblement au cas où les génotypes ont été semés dans le subhumide. Au maximum, la différence entre le sulla Sgaravatti et le génotype S7L7 le plus productif a été de 3,6 t/ha de matière sèche.

2. 3. 1. 3. Evaluation de la matière sèche digestible

Afin de mieux évaluer le potentiel productif exprimé en biomasse sèche des génotypes de sulla, il a été nécessaire de convertir la biomasse sèche génotypique en biomasse sèche digestible par l'animal. Ainsi, la détermination des taux de digestibilité du fourrage produit a montré une variabilité aussi bien entre les sullas que d'une coupe à l'autre (tableau 35).

Tableau 35 Taux de digestibilité de la matière sèche du sulla local amélioré en comparaison avec le témoin Sgaravatti
 Δ_C : perte de digestibilité entre la première et la dernière coupe
Moy.: moyenne; Sgar.: Sgaravatti; C1; C2; C3 et C4: respectivement 1^{ère}, 2^{ème}, 3^{ème} et 4^{ème} coupe

	Année 1					Année 2					
	Tunis	Mateur		Tunis		Δ_C	Mateur			C4	Δ_C
		C1	C2	C3			C1	C2	C3		
	%										
S1L10	82,4	83,4	88,2	85,3	80,3	-7,9	88,8	87,5	85,9	78,7	-10,1
S4L4	77,0	77,8	86,9	80,1	75,5	-11,4	87,8	86,4	80,8	71,8	-16,0
S7L7	69,9	70,0	82,0	74,5	70,9	-11,1	85,4	83,5	74,7	69,1	-16,3
S9L1	72,9	73,8	81,9	75,3	70,5	-11,4	81,5	77,8	75,5	68,2	-13,3
S10L4	63,6	65,2	80,9	70,9	62,3	-18,6	84,4	76,7	73,7	60,9	-23,5
S14L6	75,8	75,3	85,9	78,3	74,8	-11,1	85,0	80,8	78,7	70,4	-14,6
Moy.	73,6	74,2	84,3	77,4	72,4	-11,9	85,5	82,1	78,2	69,8	-15,7
Sgar.	74,2	76,8	86,0	78,1	70,8	-15,2	87,4	81,0	78,6	63,2	-24,2

L'avancement des coupes dans le temps a été accompagné d'une baisse de la digestibilité du fourrage. Cependant, cette évolution n'a pas varié de la même manière pour tous les sullas. Par rapport aux géotypes du sulla local amélioré, Sgaravatti tend à plus réduire sa digestibilité entre la 1^{ère} et la dernière coupe. Cette perte de digestibilité de la matière sèche a varié de -15,2 à -24,2 % respectivement pour les sites de Tunis et Mateur (tableau 35). Le sulla S1L10 a mieux conservé sa digestibilité de matière sèche respectivement 80,3 et 78,7 % pour les coupes C3 et C4 de Tunis et Mateur. Cette spécificité, a résulté du fait que S1L10 s'est caractérisé par une croissance de type indéterminée qui lui a permis de former aussi bien des feuilles que des fleurs en même temps. L'abondance de la surface foliaire dans les tiges a amélioré la digestibilité et par conséquent la valeur nutritive du sulla S1L10.

Dans le semi-aride, et au cours de la deuxième année de production, Le total de biomasse sèche digestible a varié de 2,8 à 7,6 t/ha respectivement pour Sgaravatti et S1L10 (figure 34). Ce gain de matière sèche digestible de 4,8 t/ha qu'on peut obtenir par introduction d'un sulla local amélioré comme S1L10 représenterait une ressource fourragère non négligeable pour un élevage de type bovin laitier. L'écart de production de matière sèche digestible observé entre les divers sullas s'est anéanti dans le subhumide pour atteindre seulement 2 t/ha toujours avec les mêmes géotypes.

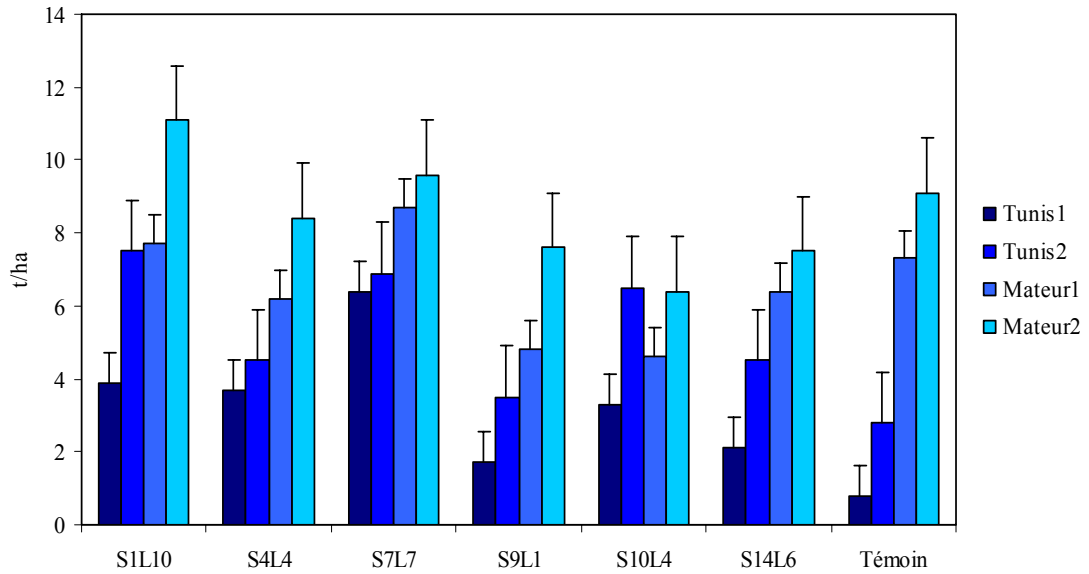


Figure 34 Variation de la production totale en matière sèche digestible de 1^{ère} et 2^{ème} année de culture des sillas dans les deux sites de Tunis-INAT et Mateur en comparaison avec le témoin Sgaravatti
 Tunis1 et 2: Tunis au cours des 1^{ère} et 2^{ème} année de culture des sillas; Mateur1 et 2: Mateur au cours des 1^{ère} et 2^{ème} année de culture des sillas

2. 3. 2. Stabilité de la production fourragère

En 2004, Barbottin a montré qu'un génotype donné peut être adapté à un milieu ou un ensemble de milieux, soit parce qu'il n'a pas rencontré le facteur limitant qui caractérise ce(s) milieu(x) soit parce qu'il est résistant aux facteurs communs à ces milieux. La mesure de l'écovalence environnementale permet ainsi d'identifier les génotypes de sillas les plus stables dans les deux sites expérimentaux. Rappelons que cet indice a été obtenu selon la formule de Wiricke en 1962. Plus cette écovalence est élevée, plus l'environnement participe à l'interaction avec le génotype. A titre d'exemple la détermination de l'écovalence de 1^{ère} année de culture de S1L10 dans les sites de Tunis et Mateur a été la suivante:

$$W^2_i = \sum (Y_{ij} - Y_{i.} - Y_{.j} + Y_{..})^2 \quad (\text{Wiricke en 1962})$$

avec: Y_{ij} : production moyenne de S1L10 à Tunis puis à Mateur;
 $Y_{i.}$: production générale de S1L10 pour les 2 sites;
 $Y_{.j}$: production moyenne de tous les génotypes à Tunis et Mateur; et
 $Y_{..}$: production générale quelque soit le génotype et le milieu.

L'application numérique de cette équation donne:

$$Y_{ij}: 4,8 \text{ t/ha (Tunis) et } 9,2 \text{ t/ha (Mateur);}$$

$$Y_{i.}: 7,0 \text{ t/ha;}$$

$$Y_{.j}: 4,3 \text{ t/ha (Tunis) et } 8,7 \text{ t/ha (Mateur); et}$$

$$Y_{..}: 6,5 \text{ t/ha.}$$

Donc, $W^2_{i.} = (4,8 - 7,0 - 4,3 + 6,5)^2 + (9,2 - 7,0 - 8,7 + 6,5)^2 = 0$

Tableau 36 Ecovalence environnementale des sullas dans les sites de Tunis-INAT et Mateur au cours de la première et deuxième année de culture

Géotypes	1 ^{ère} année	2 ^{ème} année	moyenne
S1L10	0,00	0,02	0,01
S4L4	0,72	0,25	0,48
S7L7	0,61	0,50	0,55
S9L1	0,05	0,85	0,90
S10L4	3,13	11,05	7,09
S14L6	0,85	0,08	0,46
Moyenne	0,89	2,12	1,50
Sgaravatti	8,00	8,00	8,00

Dans ces conditions, le sulla S1L10 est le géotype qui a le plus minimisé son écovalence. Ceci a été valable aussi bien pour la première que la deuxième année de culture respectivement 0 et 0,02 (tableau 36). Malgré que le sulla Sgaravatti s'est mieux comporté en deuxième année de culture, son écovalence a été élevée de l'ordre de 8 pour les deux années. Le géotype S10L4 a été trouvé le moins stable de tous les sullas locaux. Ces références calculées à partir de l'écovalence environnementale, sont d'un grand intérêt car elles nous permettent d'évaluer le degré d'adaptation de chaque géotype à des milieux différents. Ainsi, entre le subhumide Mateur et le semi-aride Tunis, S1L10 a permis d'obtenir les rendements fourragers les plus stables même s'il n'a pas été toujours le meilleur producteur de fourrage.

2. 3. 3. Rendements énergétique et protéique des sullas

Avec un besoin annuel énergétique de 130×10^7 UFL, l'élevage bovin tunisien constitue une composante principale du développement économique. Cependant, ce secteur souffre d'une insuffisance chronique en matière de fourrage. Les insuffisances sont principalement de type protéique conduisant souvent à des importations très élevées de protéines végétales (principalement le tourteau de soja). Les emblavures réservées aux fourrages sont déséquilibrées. Sur un total de 276 807 ha, les fabacées fourragères ne couvrent que 5,4 % des surfaces et le sulla n'est présent que sur 1,15 % des terres (MAERH, 1999).

L'avoine occupe la grande part avec 170 473 ha, elle fournit souvent un fourrage de qualité juste moyenne vu la mauvaise conduite des techniques culturales. A titre indicatif, Mansour (1997) a montré que dans les meilleures conditions de culture, l'avoine cultivée en Tunisie avait une production moyenne d'énergie équivalente à 3890 UFL/ha.

L'introduction de nouveaux matériels biologiques productifs et adaptés avec un accroissement des emblavures réservées aux fabacées fourragères serait une bonne solution à cette situation.

2. 3. 3. 1. Production énergétique des sullas

Dans le semi-aride, le potentiel énergétique de Sgaravatti a été largement diminué par les conditions du milieu où il produisait seulement 3638 UFL/ha (total de deux années de culture), soit une moyenne annuelle de 1819 UFL/ha.

Dans cette situation, le sulla local le moins performant a fournit 5304 UFL/ha soit 2652 UFL/ha.an. Le génotype S7L7 s'est trouvé en première position avec une production de 13716 UFL/ha, donc 6858 UFL/ha.an (tableau 37).

Tableau 37 Potentiel de production énergétique totale (UFL/ha.an) du sulla local amélioré en comparaison avec le témoin Sgaravatti, dans les sites de Tunis-INAT et Mateur
Les moyennes suivies par la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil 5 %

Génotypes	Tunis	Mateur	Moyenne
	UFL/ha.an		
S1L10	5198 b	8554 b	6876 b
S4L4	3952 c	7163 c	5558 d
S7L7	6858 a	9571 a	8214 a
S9L1	2652 e	5448 e	4050 f
S10L4	5558 b	6269 d	5913 c
S14L6	3266 d	7007 c	5137 e
Moyenne	4581	7335	5958
Sgaravatti	1819 f	8268 b	5043 e
LSD 5%	372,33	496,34	303,39

En comparaison avec l'avoine qui représente désormais, la culture fourragère la plus répandue en Tunisie, tous les génotypes du sulla y compris Sgaravatti avaient produit par hectare et par an une quantité d'énergie (UFL) largement supérieure. Ceci montre l'intérêt d'intensifier la culture du sulla dans les systèmes fourragers afin de réduire un déficit alimentaire assez sensible spécialement dans les régions semi-arides.

2. 3. 3. 2. Estimation des protéines brutes des sullas

Une différence significative a été trouvée entre les productions de protéines brutes par les sullas dans les deux sites Tunis et Mateur. Dans le semi-aride, le géotype S7L7 avait produit 7 fois plus de protéines par hectare que le sulla Sgaravatti de première année. Lors de sa deuxième année de production, le témoin avait donné plus de protéines mais sans atteindre le niveau de S7L7 qui produisait 2,3 fois plus. La différence génotypique a été moins importante dans le subhumide quoique certains sullas comme S1L10 ou S7L7 occupaient toujours la première position pour produire plus de protéines (tableau, 38).

Tableau 38 Potentiel de production protéique totale (t/ha.an) du sulla local amélioré en comparaison avec le témoin Sgaravatti dans les sites de Tunis-INAT et Mateur
Les moyennes suivies par la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil 5 %

Géotypes	Tunis	Mateur t/ha.an	Moyenne
S1L10	1,1 ab	1,7 ab	1,4 ab
S4L4	0,9 bc	1,4 ab	1,1 bc
S7L7	1,3 a	1,9 a	1,6 a
S9L1	0,6 cd	1,2 b	0,9 c
S10L4	1,3 a	1,4 ab	1,4 ab
S14L6	0,8 bc	1,4 ab	1,1 bc
Moyenne	1,0	1,5	1,2
Sgaravatti	0,4 d	1,7 ab	1,0 c
LSD 5%	0,36	0,56	0,32

En moyenne, dans le semi-aride, Sgaravatti avait produit 40 % de la production moyenne des géotypes locaux. Alors qu'à Mateur, toutes les productions en protéines se sont relativement équilibrées avec des valeurs variantes entre 1,2 et 1,9 t/ha.an.

Comparée au sulla, l'avoine produit nettement moins de protéines brutes (0,6 t/ha.an). En effet, le géotype le moins performant S9L1 avait produit 1,5 fois la production de l'avoine. (tableau 38). Alors qu'en présence de géotypes meilleurs comme S7L7, la production a été 2,6 fois celle de l'avoine. Ceci montre encore une fois que l'espèce sulla peut améliorer les systèmes fourragers actuellement déficitaires en matière de protéines.

2. 4. Conclusion

La sélection des populations sauvages du sulla du nord (*Hedysarum coronarium* L.) a mis au point certains géotypes prometteurs comme S1L10 ou bien S7L7. Leurs productions en matière sèche et protéines brutes, précocité de production hivernale, bonne stabilité de production entre le subhumide et le semi-aride sont là des indices significatifs affirmant l'intérêt d'avoir promu et améliorer les ressources phytogénétiques fourragères et pastorales locales.

Ces nouveaux géotypes se sont doués d'une meilleure voire excellente production fourragère dans le semi-aride. Dans ce bioclimat, le sulla Sgaravatti avait une production significativement plus faible que les géotypes locaux. En plus, comparé au niveau actuel de la production fourragère pluviale tant énergétique que protéinique et qui est basée sur l'avoine, le sulla peut largement augmenter cette production et réduire en conséquence la part d'aliment pour le bétail complété sous forme de tourteau de soja.

3. PLACE DE *Hedysarum coronarium* L. DANS LES SYSTEMES DE ROTATION

3. 1. amélioration des systèmes de rotation par le sulla

L'intensification des systèmes de culture a fait apparaître des divergences entre leurs composantes de production aboutissant à la monoculture. Les céréales ont été les premières cultures à bénéficier de cette situation. La base de ce système a été l'utilisation accrue de fertilisants chimiques dont principalement l'azote et les produits phytosanitaires en particulier fongicides et insecticides.

Dans certains cas, le rôle du sol s'est limité à un simple support pour le système racinaire. La minéralisation de la matière organique s'est accentuée avec la multiplication des opérations de travail du sol provoquant aussi bien une dilution qu'une accélération de la minéralisation de la matière organique (Steed *et al.*, 1993) et de l'érosion des sols en pente (Slim, 2004).

3. 1. 1. Effet des rotations sur la fertilité organique du sol

En Tunisie, les fabacées fourragères sont très peu représentées dans les systèmes de culture où l'avoine se trouve incorporée dans les rotations comme précédent cultural pour le blé (Baccouche, 1998).

3. 1. 1. 1. Les restitutions aériennes et racinaires par les cultures

Dans le semi-aride et entre 1990-1999, le blé (*Triticum durum* Desf.) en continu (BBBB) a restitué au sol une moyenne de 1,7 t/ha.an de matière sèche, l'équivalent de 43 % des résidus laissés annuellement au sol par une rotation à sulla avec le blé (SSBB).

Dans les mêmes conditions pédoclimatiques et après deux années de culture, le sulla du nord (*Hedysarum coronarium* L.) a fait revenir au sol 9,2 t/ha de matière sèche (tableau. 39). Comparé à l'avoine, Mansour (1997) a montré qu'elle peut restituer l'équivalent de 1,5 t/ha.an de résidus secs dans les conditions du semi-aride tunisien.

Tableau 39 Restitutions annuelles des résidus secs par les diverses cultures *Hedysarum coronarium* L.¹ & *Hedysarum coronarium* L.²: *Hedysarum coronarium* L. respectivement de 1^{ère} et 2^{ème} année

Cultures	résidus secs (t/ha)		
	Racines	Chaumes/fanes	Total
<i>Triticum durum</i> Desf.	0,7 +/-0,1	1,0 +/-0,2	1,7 +/-0,3
<i>Hedysarum coronarium</i> L. ¹	1,1 +/-0,2	1,1 +/-0,2	2,2 +/-0,4
<i>Hedysarum coronarium</i> L. ²	3,0 +/-0,1	4,0 +/-0,3	7,0 +/-0,4
Total <i>Hedysarum coronarium</i> L.	4,1 +/-0,1	5,1 +/-0,2	9,2 +/-0,3
<i>Brassica napus</i> L.	1,0 +/-0,2	1,1 +/-0,4	2,1 +/-0,6
<i>Vicia faba</i> L. var. <i>minuta</i> (Hort. ex Alef.) Mansf.	0,6 +/-0,3	0,8 +/-0,2	1,4 +/-0,5

D'autres cultures annuelles ont permis d'accroître les résidus restitués au sol. Dans ce cas, le colza (*Brassica napus* L.) a fourni au sol au moins 20 % de plus que le blé dur.

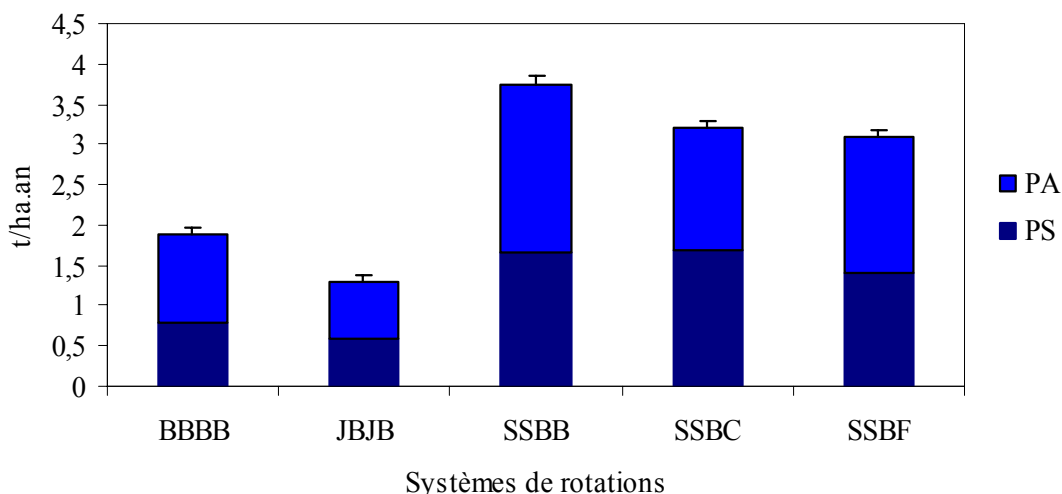


Figure 35 Résidus secs annuels aériens (PA) et racinaire (PS) restitués par les systèmes de rotation entre 1990 et 1999
 BBBB: blé continu; JBJB: jachère/blé; SSBB: sulla1/sulla2/blé/blé; SSBC: sulla1/sulla2/blé/colza; SSBF: sulla1/sulla2/blé/féverole

Seulement, la féverole (*Vicia faba* L. var. *minuta* (Hort. ex Alef.) Mansf.) s'est trouvée comme la culture la moins restitutive de résidus (1,4 t/ha.an).

Le système jachère/blé (JBJB) a été le moins productif en résidus restitués au sol avec 1,3 t/ha.an. Le système blé continu a ajouté un petit plus par rapport au précédent système avec 1,8 t/ha.an. L'introduction du sulla du nord a haussé ces résidus de 49 et 65 % par rapport aux systèmes jachère/blé et blé en monoculture.

Les systèmes de rotations (SSBB), (SSBC) et (SSBF) ont apporté au sol respectivement la somme de 3,7; 3,2 et 3,1 t/ha.an de matière sèche (figure 35). La jachère encore pratiquée dans la Tunisie septentrionale où elle occupe annuellement entre 300 et 400 000 ha s'est trouvée comme la sole qui fait perdre annuellement au sol 2,4 t/ha de résidus secs par rapport au sulla. L'effet de ces restitutions sur les teneurs en matière organiques du sol est variable selon la quantité mais surtout la qualité des résidus enfouis (Varvel, 1994).

3. 1. 1. 2. Evaluation de la matière organique du sol

Le taux de matière organique représente un indicateur de fertilité et de santé pour un sol donné. La richesse des sols en matière organique est considérée comme un critère pour définir leur qualité (Doran et Parkin, 1994). En effet, toute réduction de la matière organique représente une perte de qualité pour le sol. Par rapport à un blé continu, les rotations à base de sulla et féverole ou bien de colza ont provoqué un accroissement du taux de la matière organique variant de 0,095 à 0,1 %/an. Cette situation a été démontrée par plusieurs recherches (Johnston, 1986; Havlin *et al.*, 1990). Le système sulla/sulla/blé/blé (SSBB), qui avait fourni au sol le plus de résidus organiques n'a pas entraîné le meilleur taux d'amélioration de la matière organique durant la phase de l'essai (tableau 40). Dans ce cas la qualité des résidus intervient pour montrer que probablement l'élément azote peut jouer un rôle dans l'élaboration de la matière organique du sol (Varvel, 1994).

Tableau 40 Effet des rotations culturales sur la teneur du sol en matière organique

Systèmes de rotations	matière organique (%)	
	1990	1999
blé continu	1,15	1,01 c
jachère/blé	1,15	1,04 c
sulla/sulla/blé/blé	1,15	1,91 b
sulla/sulla/blé/colza	1,15	1,93 ab
sulla/sulla/blé/féverole	1,15	1,95 a
LSD 5%	-	0,03

Dans le semi-aride, il est souvent difficile de maintenir dans le sol un niveau de matière organique assez élevé. L'irrégularité des précipitations influe directement sur le développement et la production des cultures et par conséquent sur la quantité de matière organique restituée au sol. Dans ces conditions, les espèces ou variétés adaptées comme le sulla pourraient réduire les écarts de production et assurer ainsi une meilleure durabilité au système dans le quel elles sont utilisées.

Yankovitch (1955) a montré que dans les conditions méditerranéennes semi-arides et arides, le niveau humique des terres est assez bas. En plus les systèmes de culture pratiqués ont favorisé la dégradation des sols; à tel point que la sole jachère est considérée comme destructrice de l'humus du sol. D'après Monnier, (1965), la décomposition des résidus des cultures a un rôle de fertilisation bref mais important. Les fabacées fourragères fournissent un niveau considérable de matière organique à partir des racines. Les soles comportant au moins une fabacée par cycle de rotation ont vu leur taux de matière organique s'améliorer plus rapidement. En comparaison avec les autres systèmes, la rotation qui inclue une sole de jachère a entraîné une perte humique de 130 kg/ha.an par rapport à un blé continu qui lui-même s'est trouvé en déficit de 350, 230 et 200 kg/ha.an par rapport respectivement aux systèmes de rotation SSBB, SSBC et SSBF (figure 36).

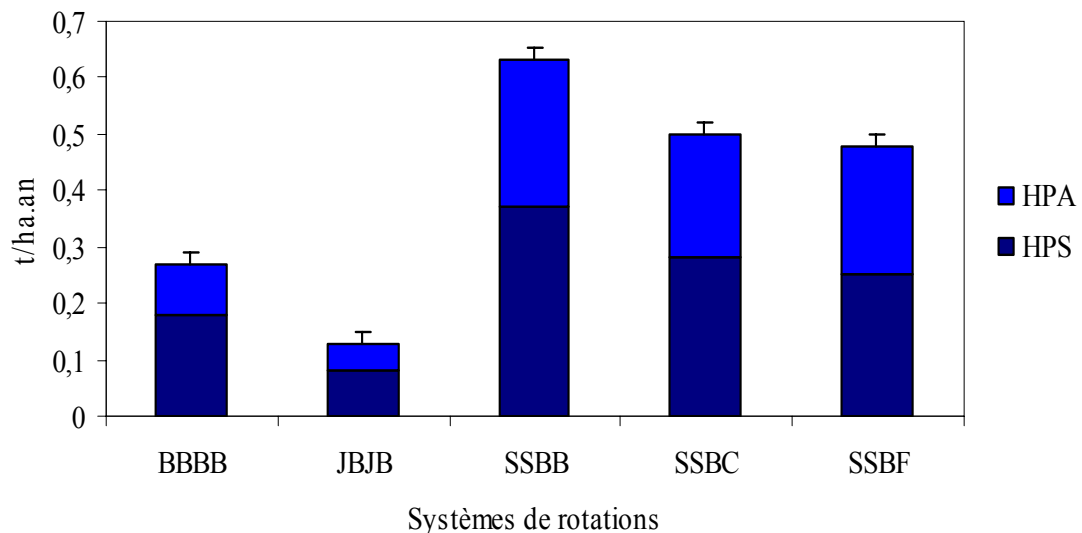


Figure 36 Estimation de la matière humique produite annuellement par les parties aérienne (HPA) et racinaire (HPS) des différents systèmes de rotation durant la décennie 1990-1999
 BBBB: blé continu; JBJB: jachère/blé; SSBB: sulla1/sulla2/blé/blé; SSBC: sulla1/sulla2/blé/colza; SSBF: sulla1/sulla2/blé/féverole

La perte humique s'est élevée plus au cas où la jachère a substitué le sulla et est devenu de l'ordre de 480 kg/ha.an. Dans le cas où le système de monoculture de blé dur a été interrompu par une culture de sulla bisannuelle, l'amélioration moyenne des teneurs humiques du sol a été de 56,4 %.

L'incidence de l'enfouissement des résidus de cultures sur le niveau organique du sol s'est manifesté très nettement. Vu la lenteur des mécanismes intervenant dans la minéralisation de la matière organique fraîche et de la multiplicité des facteurs qui interviennent, l'étude des répercussions des cultures sur l'évolution du stock organique du sol est une opération assez complexe qui nécessite un optimum de temps pour pouvoir tirer des résultats significatifs et exploitables.

3. 1. 1. 3 Evaluation des restitutions azotées par les diverses cultures

L'azote est toujours considéré comme un élément minéral essentiel de toute production, il a été étudié par plusieurs recherches afin d'évaluer son effet sur les systèmes de production (Westerman *et al.*, 1994). L'azote qui est aussi bien restitué au sol que prélevé par la culture dépend étroitement du niveau de production atteint par la culture. Un sulla laissé sur la même sole deux années consécutives a conservé au sol la plus grande quantité d'azote dépassant 200 kg/ha sur un horizon de 0-60 cm de sol (tableau 41). Le sulla a pu exporter jusqu'à 149,4 kg/ha à plus de 85 % de nature biologique et au cours de la première année. Cette variabilité dépend principalement des conditions climatiques de l'année de culture. Cette valeur a été nettement supérieure à celle d'une prairie de ray gras pérenne (*Lolium perenne* L.) en climat tempéré qui peut fournir au sol entre 50 et 150 kg/ha (Simon *et al.*, 1997).

Tableau 41 Résidus azotés restitués annuellement au sol dans un horizon de 60 cm de profondeur et exportations d'azote par chaque culture incorporée dans les systèmes de rotation durant la décennie 1990-1999
Hedysarum coronarium L.¹ & *Hedysarum coronarium* L.²:
Hedysarum coronarium L. respectivement de 1^{ère} et 2^{ème} année

Culture	restitution en kg/ha.an	exportation
<i>Triticum durum</i> Desf.	24,6 +/- 3,8	125,0 +/- 36,3
jachère	26,1 +/- 1,4	0
<i>Hedysarum coronarium</i> L. ¹	94,0 +/- 25,0	149,4 +/- 47,6
<i>Hedysarum coronarium</i> L. ²	226,8 +/- 12,5	294,4 +/- 78,8
<i>Vicia faba</i> L. var. <i>minuta</i> (Hort. ex Alef.) Mansf.	82,6 +/- 29,3	103,8 +/- 48,2
<i>Brassica napus</i> L.	91,6 +/- 30,3	140,9 +/- 67,8

La culture de sulla de 2^{ème} année s'est trouvée comme la plus exportatrice d'azote (294,4 k/ha) de nature principalement biologique, provenant de la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique par son rhizobium spécifique (*Rhizobium sullae* Squartini *et al.*, 2002, sp. nov.). En fonction des prélèvements et restitutions azotés de chaque culture, les systèmes de rotation blé continu ou jachère/blé ont présenté un déficit azoté qui devrait être comblé par un apport d'engrais chimique. En tant que Brassicaceae, les exigences azotées du colza peuvent être en partie satisfaites par un précédent cultural comme le sulla, sinon un supplément azoté minéral est nécessaire pour la culture. Ces résultats ont montré qu'il est possible par l'utilisation d'un système de rotation approprié de maintenir mais en plus d'améliorer la fertilité organique et azotée du sol. Les cultures céréalières comme le blé dur sont les premières à tirer profit des avantages de leurs précédents culturaux.

3. 1. 1. 4. Restitutions azotées par les divers systèmes de rotation

Dans le cas où le blé a occupé 50 % des soles (jachère/blé), le manque d'azote a été de 68,5 kg/ha.an. En général, les soles à Fabaceae ou Brassicaceae ont été les plus exportatrices d'azote et en même temps les plus rémunératrices pour la culture suivante. L'exportation de l'azote par le blé dur semé dans un sol pauvre en matière organique (1,15 %) a engendré souvent des bilans azotés déficitaires (figure 37).

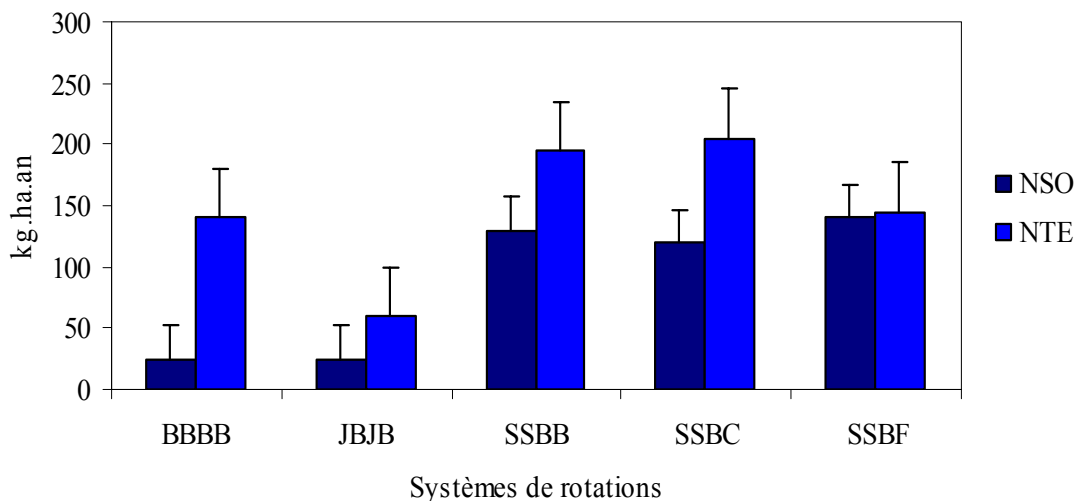


Figure 37 Restitutions azotées au sol moyennes annuelles (NSO) par les systèmes de rotation comparées aux exportations azotées respectives (NTE) durant la décennie 1990 et 1999
 BBBB: blé continu; JBJB: jachère/blé; SSBB: sulla1/sulla2/blé/blé; SSBC: sulla1/sulla2/blé/colza; SSBF: sulla1/sulla2/blé/féverole

Le système blé continu (BBBB) ou bien blé interrompu par une jachère (JBJB) ont restitué au sol la plus faible quantité azotée de l'ordre de 25 kg/ha dans une couche de terre de 0-60 cm de profondeur (figure 37). L'introduction du sulla ou bien la féverole a fait augmenter significativement l'apport azoté de la rotation.

Le taux d'amélioration de l'azote restitué au sol annuellement par les systèmes de rotation (SSBB), (SSBC) et (SSBF) a varié de 80 à 82 %. Les recherches menées dans ce cadre ont montré que les fabacées fourragères peuvent contribuer à l'amélioration du niveau azoté du sol par rapport à une monoculture de blé ou une jachère (Khan, 1971 et Cowell et Doyle, 1993).

En tenant compte des exportations annuelles par sole dans les divers systèmes de rotation et sans tenir compte de la nature de l'azote chimique ou biologique (fixation symbiotique de l'azote), les prélèvements par les divers systèmes ont dépassé largement les réserves azotées du sol. Ceci est d'autant plus élevé pour les soles à blé dur continu où le déficit annuel est de 113 kg/ha.an. Selon les cultures introduites dans les rotations, l'assolement quadriennal à 75 % de fabacées (SSBF) a été le moins déficitaire avec seulement 12,7 kg/ha.an.

3. 1. 2. Productivité des systèmes de rotation

3. 1. 2. 1. Evaluation de la productivité moyenne annuelle des systèmes de rotation

Selon la rotation, la production de la biomasse a été exprimée sous forme de matière première (grains de blé, graines de féverole, matière sèche fourragère) et sous forme de matière secondaire (paille ou fanes). Le système de rotation à 50 % blé et 50 % jachère (JBJB) a été le moins productif avec 4,7 t/ha.an durant la décennie 1990-1999, dont 1,8 t/ha se trouve sous forme de grains (figure 38).

Le système blé continu (BBBB) avait produit au moins le double des autres systèmes sous forme de paille (5,7 t/ha.an). Ce système qui recevait la plus grande quantité d'azote ne s'est pas trouvé le meilleur producteur de matière première sous forme de grains.

L'introduction d'espèces fourragères dans les systèmes de rotation serait une voie permettant d'atteindre les objectifs d'une agriculture durable. Cette question a été abordée depuis 1946 par Garber *et al.* qui recommandaient les fourrages dans les zones marginales édaphiquement et climatiquement pour une agriculture stable. En effet, le système SSBC qui est basé sur 25 % de blé et 75 % de fourrage (sulla et colza) a permis d'atteindre le plus fort rendement en matière première (8 t/ha.an), tout en donnant la plus faible production de paille et fanes (1,3 t/ha.an) (figure 38). La substitution de la sole colza par un blé, n'a pas entraîné de baisse significative de la production au sein du système SSBB avec 50 % sulla et 50 % blé. Seulement, avec une protéagineuse comme la féverole, le rendement du système de rotation SSBF a marqué une baisse de 19 % par rapport au système SSBB le plus producteur. Le manque de variété de féverole à haute production de graines et bien adaptée au semi-aride a été la cause principale de cette baisse.

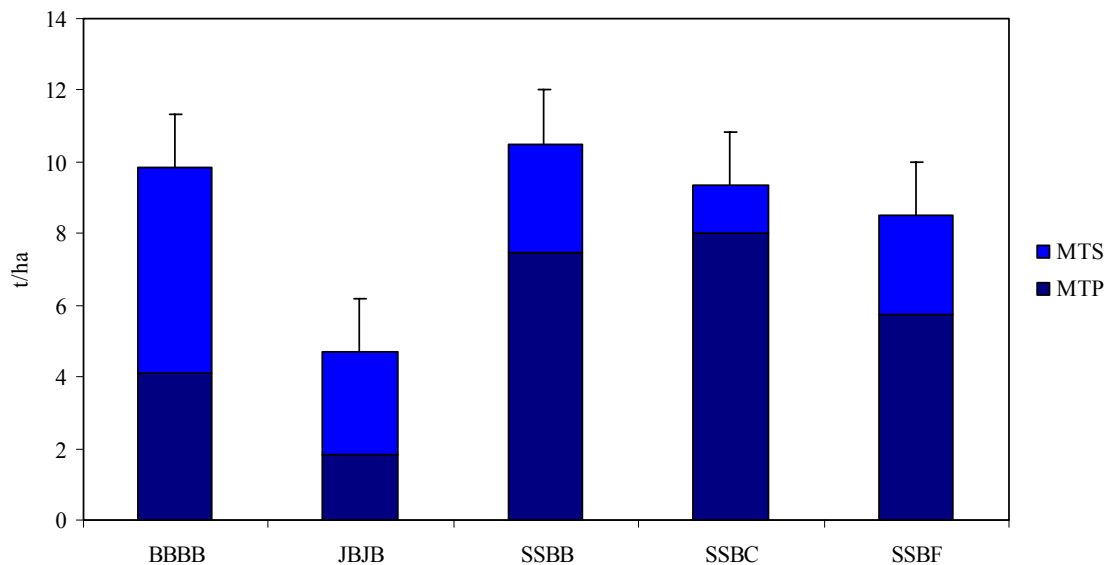


Figure 38 Evaluation de la production moyenne annuelle des systèmes de rotation répartie en matière première (MTP) sous forme de grains ou fourrage sec et matière secondaire (MTS) sous forme de paille ou fanes durant la décennie 1990-1999
 BBBB: blé continu; JBJB: jachère/blé; SSBB: sulla1/sulla2/blé/blé; SSBC: sulla1/sulla2/blé/colza; SSBF: sulla1/sulla2/blé/féverole

3. 1. 2. 2. Effet du précédent cultural sur les rendements des cultures

Afin d'homogénéiser les productions obtenues par chaque système de rotation, il s'est avéré utile de présenter les résultats par cycle d'une rotation quadriennale soit 4 années. Il est à noter que la production moyenne du sulla dans un système de rotation incluant une légumineuse protéagineuse comme la féverole a baissé de 25 % après deux cycles de rotation entre 1990 et 1999. L'effet précédent fabacée sur une deuxième fabacée même si la deuxième est du type fourrager s'est confirmé dans ce cas. L'estimation du rendement cyclique (4 années) du sulla après le blé a été de 18,4 t/ha de matière sèche .

Le colza fourrager en rotation avec le sulla dans le système sulla/sulla/blé/colza, a favorisé un apport fourrager de 24,9 t/ha de matière sèche, tout en entraînant la meilleure productivité annuelle du blé dur (5,7 t/ha). Par cycle de 4 années, le rendement en grains du blé dur est passé de 16,5 à 10,3 t/ha respectivement avec les systèmes de rotation BBBB et SSBB (tableau 42).

Tableau 42 Production totale des systèmes de rotation par cycle de 4 ans durant la décennie 1990-1999

Système de rotation	fourrage matière sèche	protéagineux graines	céréale grains	paille & fane	biomasse totale
BBBB	0	0	16,5	22,9	39,4
JBJB	0	0	3,6	5,7	9,3
SSBB	18,4	0	10,3	10,5	39,2
SSBC	24,9	0	5,7	5,3	35,9
SSBF	13,8	2,7	4,5	6,0	27,0

Cependant, le système BBBB manque de diversité de cultures tant nécessaire dans les régions semi-arides de la Tunisie mais aussi hautement consommateur d'azote. Par cycle quadriennal de rotation, le système JBJB a donné la plus faible biomasse (9,3 t/ha). Alors que, le blé dur continu produisait la plus forte biomasse suivi du système de rotation SSBB avec respectivement 39,4 et 39,2 t/ha.

Il est à signaler que la présence d'une production fourragère sous forme de sulla peut être une composante principale dans une agriculture de type intégré surtout pour les petites et moyennes exploitations agricoles (Slim, 2004). En plus, l'introduction des fabacées fourragères dans les conditions méditerranéennes a favorisé un équilibre entre les besoins de l'élevage et du système de culture à travers une meilleure rotation (Abou Akkada, 1988).

3. 1. 3. Estimation des productions énergétiques par cycle de rotation quadriennal

La conversion de la production des différentes spéculations en unité énergétique, unité fourragère lait (UFL), permet d'homogénéiser les rendements et de comparer les systèmes de rotation selon le même critère.

La production énergétique du blé dur dans un système de rotation JBJB représentait seulement 22,6 et 34,5 % de celle d'un blé respectivement en continu BBBB et après deux années de sulla SSBB. Contrairement aux systèmes de rotation SSBB, SSBC et SSBF, le niveau énergétique relativement important obtenu par le système BBBB a nécessité un apport massif d'azote (en moyenne 120 kg /ha.an). Concernant la production fourragère des soles, la rotation SSBC avait produit la plus forte biomasse énergétique de 18 600 UFL/ha (figure 39).

En terme de comparaison, les systèmes les plus productifs sont ceux qui ont participé avec au moins 50 % d'espèces fourragères comme le sulla ou bien le colza. Le rendement par cycle de rotation a varié de 30 200 à 27 400 UFL/ha respectivement avec les systèmes SSBB et SSBC.

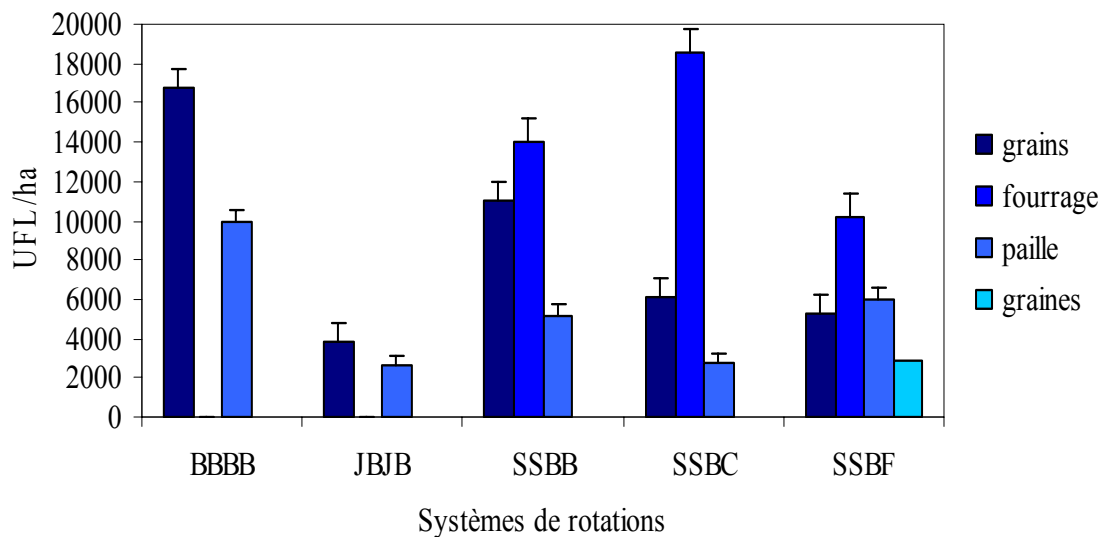


Figure 39 Production énergétique totale des systèmes de rotation par cycle de 4 ans exprimée en UFL durant la décennie 1990-1999
 BBBB: blé continu; JJB: jachère/blé; SSBB: sulla1/sulla2/blé/blé; SSBC: sulla1/sulla2/blé/colza; SSBF: sulla1/sulla2/blé/féverole

L'introduction d'espèces fourragères dans les rotations a favorisé ainsi une certaine diversité de production. La disponibilité d'une ressource fourragère dans ce cas incite la présence d'un élevage. Dans ces systèmes, certaines opérations culturales peuvent être simplifiées telles que le contrôle des adventices et la fertilisation azotée respectivement par le biais des fauches successives d'un sulla de 2 ans et les restitutions azotées (Mouelhi, 2004). Les coupes multiples épuisent les adventices et bloquent leur développement floral. Ceci fait de la rotation un moyen visant la durabilité de l'agriculture (Viaux *et al.*, 1999).

Un système de rotation varié à deux soles de sulla (1^{ère} et 2^{ème} année), suivi par une sole de blé et une quatrième sole à base de protéagineuse comme la féverole, peut jouer un rôle dans l'amélioration quantitative et qualitative du produit. Les graines de féverole très énergétiques (1,13 UFL/kg de MS) et riches en protéines brutes (31,0 %) peuvent être utilisées à 60 % dans le produit concentré (ITCF, 1987), a fin de réduire l'apport du tourteau de soja de plus en plus cher. En général, le choix des espèces fourragères, leur localisation, leur place dans la rotation, le type et la répartition des engrais en fonction des arrières-effets du précédent cultural sont des facteurs qui doivent être pris en considération dans la conception d'un système de culture. A titre d'exemple, un système de rotation productif comme BBBB peut entraîner des arrières-effets néfastes pour l'environnement. Alors que les systèmes à sulla peuvent en même temps être de bons producteurs que protecteurs de la nature.

3. 1. 4. Importance des productions protéiques

En Tunisie, Le déficit alimentaire de nature protéique pour le bétail est dû essentiellement à des choix agronomiques qui ont souvent négligé le développement des fabacées ou d'autres espèces adaptées comme le colza dans les assolements.

Les systèmes à sulla ont permis d'augmenter la production totale quadriennale des protéines de 27 à 42 % par rapport au système conventionnel de blé en continu. La meilleure production a été trouvée avec le système SSBB qui produisait un total de 4632 kg/ha de protéines. Le système jachère a été le moins fournisseur en matière de protéines avec seulement 754 kg/ha et par cycle de rotation de 4 ans (figure, 40).

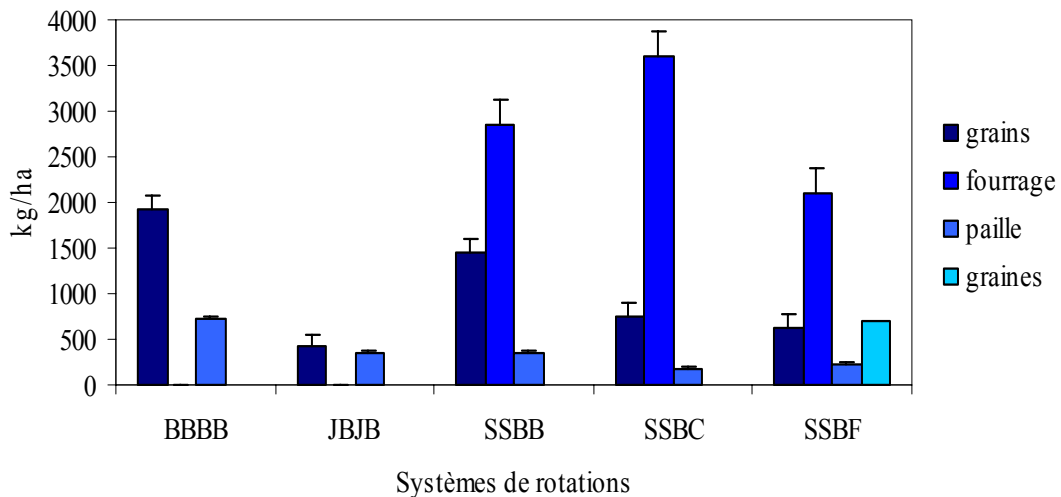


Figure 40 Production totale des protéines par cycle de 4 ans des systèmes de rotation durant la décennie 1990-1999
 BBBB: blé continu; JBJB: jachère/blé; SSBB: sulla1/sulla2/blé/blé; SSBC: sulla1/sulla2/blé/colza; SSBF: sulla1/sulla2/blé/féverole

Par rapport à un blé en monoculture, les systèmes SSBF, SSBB et SSBC ont entraîné un supplément annuel de protéines issues des grains respectivement de 137, 237 et 268 k/ha.an. Cette amélioration n'a pas été due seulement à l'amélioration des rendements en grains mais les teneurs en protéines des grains avait marqué un supplément variant de 2 à 2,4 % (tableau 43).

Tableau 43 Teneur moyenne en protéines des grains de blé dur dans les divers systèmes de rotation durant la décennie 1990-1999

Systèmes	protéines des grains (%)
Blé dans BBBB	11,8 +/- 0,5
Blé dans JBB	11,5 +/- 0,3
Blé dans SSBB	14,0 +/- 0,6
Blé dans SSBC	14,2 +/- 0,3
Blé dans SSBF	13,8 +/- 0,7

Dans les systèmes de rotation, les protéagineux très peu valorisées, peuvent aussi représenter une source protéique non négligeable. En Tunisie, les essais menés sur les pois (*Pisum sativum* L.) en condition pluviale dans le semi-aride supérieur ont montré une bonne adaptation de l'espèce mais surtout une bonne productivité de protéines. Certaines variétés de pois ont eu un taux de protéines brutes de 25 % (Boulahia, 1990). Dans les mêmes conditions, la féverole avait produit 700 kg/ha.an de protéines brutes. Ce qui représente un supplément de plus de 100 kg/ha.an par rapport à l'avoine coupée au stade épiaison (Mansour, 1997).

3. 2. Arrière-effet de *Hedysarum coronarium* L. sur la production du blé dur

3. 2. 1. Relation entre reliquat azoté dans le sol et exportation par le blé

Afin de mieux évaluer les quantités d'azote restitué au sol par le sulla puis valorisé par le blé suivant, il a été nécessaire d'étudier dans les divers systèmes des cycles de 3 ans, vu que le blé était semé après 2 années de sulla.

Pour un cycle de 3 ans, un sulla de deux années a laissé dans le sol en moyenne 226,8 kg/ha d'azote dans un horizon de 0-60 cm de profondeur. Cette quantité d'azote d'origine organique a été exportée progressivement par le blé suivant. Les systèmes communs de blé continu et jachère/blé, ont restitué au sol la plus faible quantité d'azote respectivement 52,2 et 49,2 kg/ha (figure 41).

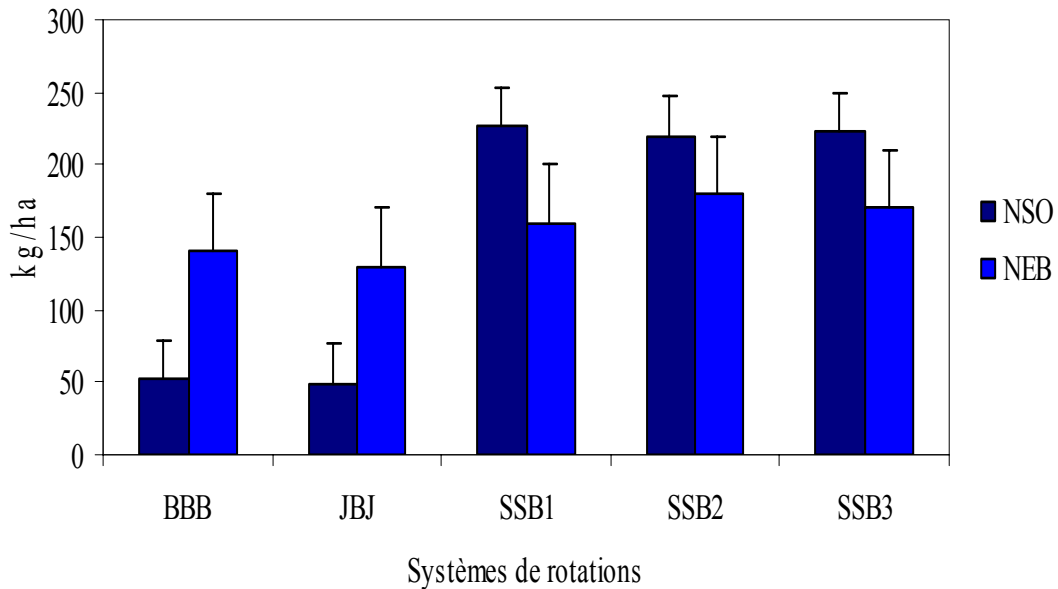


Figure 41 Variation de l'exportation azotée du blé en fonction des résidus laissés par le précédent cultural dans un cycle triennal
 BBB: blé continu; JBJ: blé après jachère; SSB1: blé après 2 années de sulla dans le système SSBB; SSB2: blé après 2 années de sulla dans le système SSBC; SSB3: blé après 2 années de sulla dans le système SSBF

Ce grand écart entre les reliquats azotés des systèmes de rotation a laissé prévoir un apport d'engrais azoté assez marqué pour la monoculture de blé dur et blé dur après jachère. Dans le cas d'un blé en continu, le déficit azoté annuel a été de l'ordre de 87,8 kg/ha et par cycle triennal de rotation. Alors que des excédents azotés ont été trouvés dans les systèmes SSB1, SSB2 et SSB3 respectivement 67, 40 et 53 kg/ha.an (figure 41).

Cependant, cette quantité d'azote issue de la minéralisation de la matière organique dans la sole où le sulla est resté deux années de suite risque le lessivage si le sol reste nu. Afin d'éviter toute perte d'azote après un sulla de deux ans, un travail superficiel du sol peut limiter la minéralisation rapide de la matière organique (Mouelhi, 2004). Dans ce système, la simplification du travail du sol ou le semis direct du blé après sulla pourrait être une solution au problème de perte possible de l'azote.

3. 2. 2. Dynamique de la surface foliaire du blé dans les systèmes de rotation

La production de grains par le blé dur est corrélée avec la croissance foliaire des plantes et leur concentration en azote.

L'effet rotation sur l'évolution de la surface foliaire n'a commencé à être visible qu'à partir du stade tallage (T) et est devenu hautement significatif au cours de la montaison du blé (M). A ce stade, la surface foliaire du blé dans le système SSBB a marqué une augmentation de 65 % par rapport au blé continu (figure 42).

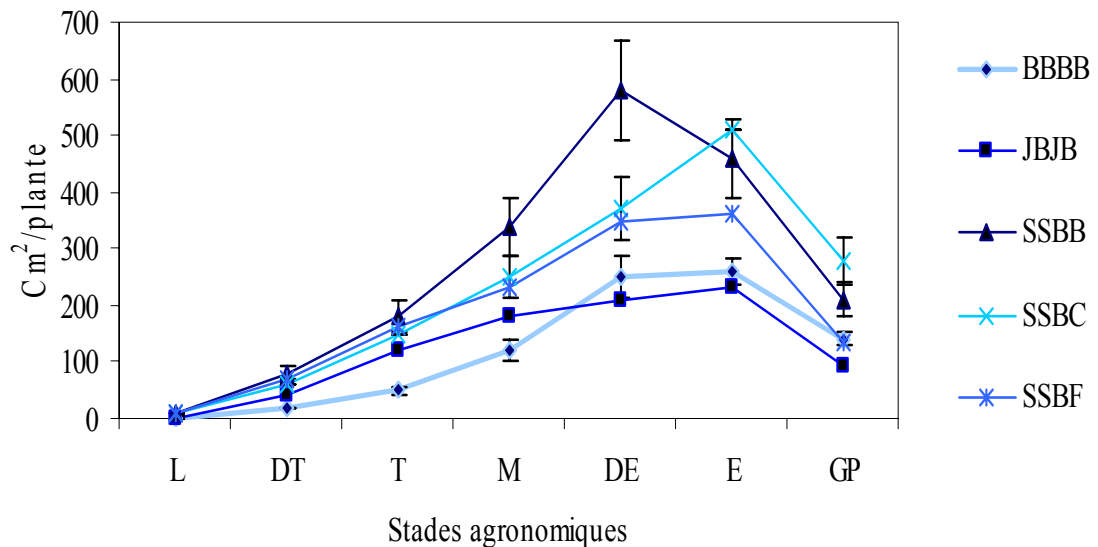


Figure 42 Evolution de la surface foliaire du blé (cm²/par plante) dans les systèmes de rotation durant la décennie 1990-1999
 BBBB: blé continu; JBJB: blé après jachère; SSBB: blé après 2 années de sulla suivi d'un autre blé; SSBC: blé après 2 années de sulla suivi d'un colza fourrager; SSBF: blé après 2 années de sulla suivi d'une féverole
 L: levée; DT: début tallage; T: tallage; M: montaison; DE: début épaison; E: épaison; GP: grain pâteux

Le stade début épaison (DE) a été marqué par les surfaces foliaires les plus élevées atteignant 580 cm²/plante avec un blé dur semé dans le système SSBB. Au stade grain pâteux (GP), la surface foliaire du blé après une jachère a été la plus faible (92 cm²/plante). La moyenne de toutes les surfaces foliaires du blé dans un système de rotation ayant comme précédent cultural une prairie de sulla de deux années s'est distinguée d'une valeur supérieure à 200 cm²/plante jusqu'au stade épaison (E) (figure 42). Souvent, cet effet est marqué par les divers niveaux d'azote qui se trouvent dans le sol (Evans *et al.*, 1989). L'état de la surface foliaire à un stade avancé de la végétation est considéré comme un indice permettant de situer le niveau de la production future de grains.

3. 2. 3. Estimation du gain en grains par le blé

L'effet rotation comme décrit par (Allen *et al.*, 1996) représente la différence de rendement entre une rotation quelconque et une rotation témoin souvent une monoculture. L'effet rotation sur la production de grains de blé a été négatif dans le système jachère/blé (-0,5 t/ha), alors que les rotations à sulla se sont caractérisés par des effets positifs (figure, 43).

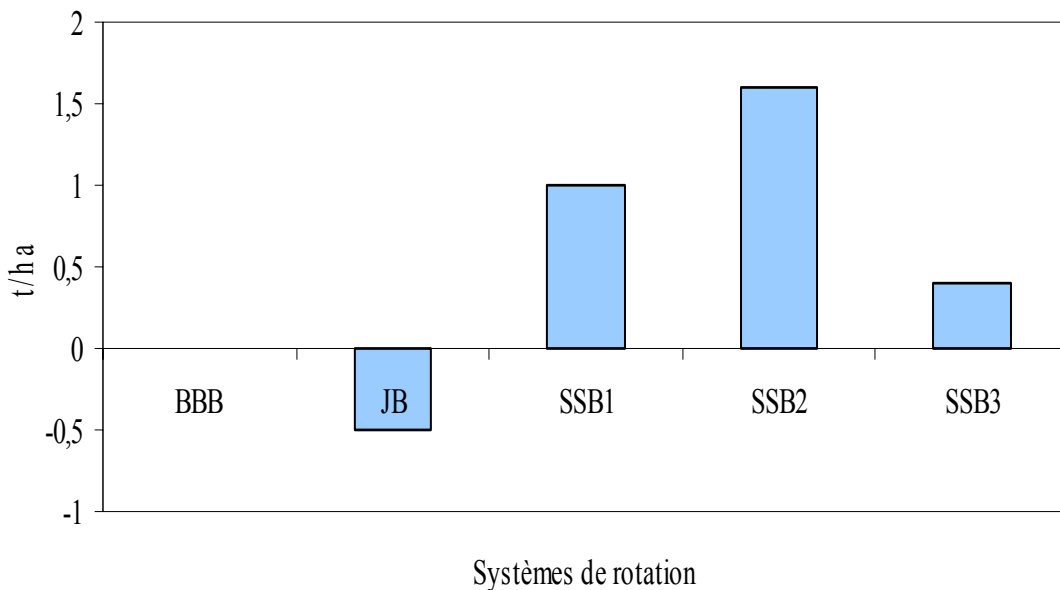


Figure 43 Evaluation de l'effet précédent cultural sur le rendement en grains du blé comparé au témoin blé continu
 BBB: blé continu; JB: blé après jachère; SSB1: blé après 2 années de sulla dans le système SSBB; SSB2: blé après 2 années de sulla dans le système SSBC; SSB3: blé après 2 années de sulla dans le système SSBF

Entre 1990 et 1999, le système de rotation Sulla/Sulla/Blé/Colza a entraîné le plus grand effet positif sur le rendement en grains de blé (+1,7 t/ha) (figure 43).

Dans le semi-aride, le système jachère/blé s'est encore confirmé comme étant un système non rentable aussi bien pour la plante que le sol par réduction respective de la production de grains de blé et de la matière organique et azotée du sol. Quelque soit le système, le sulla du nord utilisé comme précédent cultural pour le blé a favorisé en moyenne une augmentation du rendement en grains de 1 t/ha par rapport au blé dur en monoculture.

3. 3. Conclusion

Dans les systèmes de rotation, le sulla du nord (*Hedysarum coronarium L.*) a joué un rôle agronomique fondamental dans l'amélioration de la fertilité organique et azotée du sol. Cette amélioration a permis de hausser la production de grains du blé dur sans apport d'azote chimique par rapport à un blé en monoculture et qui recevait annuellement l'équivalent de 120 unités/ha. De plus, les systèmes de rotation à sulla ont été plus variés vu la production fourragère qui avait suivie. En même temps, la production en protéines a évolué vers la hausse. De cette façon, l'irrégularité quantitative et qualitative de la production souvent constatée dans les systèmes de culture des zones semi-arides de la Tunisie peut être anéantie.

CONCLUSIONS, DISCUSSIONS ET PERSPECTIVES

La prospection du sulla du nord (*Hedysarum coronarium* L.) dans la région nord de la dorsale tunisienne, a montré une réduction sensible des aires de dispersion naturelle de l'espèce signalées depuis les années '60 par Ballatore, (1963); Le Houerou, (1965); Gounot *et al.*, (1966) et Bigot *et al.*, (1967). En effet, les observations faites en 1989 ont montré que seulement 34 % des anciens sites à sulla indiqués sur les cartes phyto-écologiques de la Tunisie septentrionale ont continué encore à abriter quelques mosaïques de populations assez dispersées. Cette limitation sensible des surfaces couvertes par le sulla peut prévoir une érosion génétique. Ce phénomène s'est développé encore au cours des années de sécheresse de 2001 et 2002. En effet, certains sites comme ceux de S1, S13 et S25 ont été tellement affectés par le surpâturage et la sécheresse que les quelques plantes de sulla qui avaient existé quelques années avant, ont presque disparu (Ben Jeddi, 2004).

La collecte du germoplasme sulla du nord a visé deux objectifs:

- la préservation et la conservation des ressources phytogénétiques du sulla; et
- l'amélioration de ce germoplasme pour son utilisation future dans des systèmes de rotation améliorés.

Diversité biologique de *Hedysarum coronarium* L. spontanée et perspectives de création variétale

1. Le germoplasme sulla du nord qui a été collecté s'est caractérisé par une diversité biologique très importante. Cette espèce a été trouvée dans des milieux d'habitat naturel très variables du point de vue (sol, climat, topographie, groupement botanique...). Les populations de sulla ont pu s'étendre du semi-aride inférieur comme c'est le cas de S8; et S25 au sub-humide pour S2; et S19. Certaines régions montagneuses d'une certaine altitude (au moins 800 m) ont rassemblé quelques génotypes par exemple S10; S16; et S20. Les plaines ont été toujours des zones intéressantes pour des populations assez éparées comme S4; et S5. Ces données agro-écologiques ont montré leur intérêt dans la mesure où la caractérisation d'indicateurs spécifiques est devenu facilement accessible (Brau-Nogué, 1996). Cette diversité de répartition a engendré au sein de l'espèce des caractères et des propriétés assez ramifiés. L'architecture des plantes est un exemple intéressant à citer, car il prévoit le rôle futur du génotype dans la parcelle fourragère (affouragement en vert, fauche pour le foin ou l'ensilage, pâture...) (Bellon *et al.*, 1999). Il a été trouvé que l'orthotropie des tiges est très peu représentée, seulement 3 % des populations sont de type érigé (cas de S2). La dominance des populations à tiges mixtes serait un indice d'adaptation du matériel génétique au pâturage excessif et non contrôlé voire une situation de surpâturage dans certains sites.

Cette variabilité biologique s'est manifestée de même au niveau du comportement germinatif des populations sauvages dans diverses conditions thermiques.

Ainsi, il a été trouvé que la majorité des sillas préfère des températures comprises entre 10 et 15°C. Seulement trois populations se sont distinguées du reste par une indifférence à l'égard des températures de germination S1; S2; et S23. Parallèlement, la présence de graines dures souvent discutées lors de la sélection a varié significativement de 85 à 4 % respectivement pour S25; et S1. Cette propriété souvent remarquée chez les espèces de Fabaceae des zones semi-arides et arides représente un moyen de survie des plantes aux conditions de faible pluviosité.

2. Les opérations de sauvegarde des ressources génétiques fourragères et pastorales locales réalisées depuis des dizaines d'années dans le cadre de projets nationaux et de coopération internationale se sont limitées à une simple collecte de semences destinées directement à la perte, en raison du manque de moyens et de techniques adéquates pour la conservation. Cependant, le maintien de la viabilité des semences dans une collection active demande aussi bien de la main d'œuvre actuellement insuffisante que de grands espaces. D'ailleurs, il a été démontré que des lots de semences fourragères ont perdu rapidement leur longévité après 4 ou 5 années de conservation à température ambiante. L'humidité des semences combinée à la température du local a entraîné des qualités de conservation différentes. Les graines de *Hedysarum coronarium* L. déshydratées jusqu'à 4 % d'humidité ont maintenu la meilleure germination (> 80 %) après cinq années de conservation à -18°C. Au Laboratoire de Production Fourragère et Pastorale de l'INAT, la technique de congélation de germoplasme a permis de conserver depuis 1982 des génotypes d'orges (*Hordeum vulgare* L.), médics (*Medicago truncatula* Gaertn.), sillas (*Hedysarum coronarium* L.), vesces (*Vicia sativa* L.), blés durs (*Triticum durum* Desf.) et d'autres avec une germination située à un niveau au moins égale à 70 % (Zouaghi, 1998). Ce résultat représente pour l'améliorateur une souplesse de gestion de ses ressources génétiques utilisées au moment opportun. Dans ces conditions de bonne conservation, la variabilité génétique des espèces risque moins la dénaturation ou bien la perte directe par les différentes contraintes de l'environnement principalement les sécheresses successives et le surpâturage.

3. L'analyse de la diversité génotypique des populations sauvages de *Hedysarum coronarium* L. par la méthode *cluster* a révélé des groupes de génotypes assez intéressants pour le programme de sélection. La surface foliaire, la hauteur des plantes ainsi que la production hivernale ont été considérées comme des indices pour une installation rapide des plantes. Ceci a permis de dégager des groupes de génotypes intéressants comme A1, A2, B2 et D4 englobant les descendants des populations sauvages S1; S2; S4; S6; S7; S9; S10; S13; et S14.

La sélection récurrente phénotypique demi-frère et familiale réalisée sur ces populations de silla a développé après 4 cycles une réponse à la sélection positive pour les principaux critères suivis. En moyenne, Les protéines brutes devraient s'améliorer de 3,9 %, la matière organique digestible gagnerait 19,8 % et la production fourragère hivernale (janvier) marquerait un plus de 4,3 t/ha.

L'évaluation de la génération de sélection F4 des sullas a fait apparaître des géotypes prometteurs comme S1L10 assez riche en protéines brutes au stade floral (19 % contre 14,6 % pour le témoin Sgaravatti). En plus, sa teneur en cellulose brute a été inférieure à 20 % et sa matière organique digestible a été supérieure à 80 % au stade floraison. Alors que le sulla Sgaravatti avait 64,7 % de matière organique digestible au stade floraison.

La régularité et la répartition de la production avec le facteur hauteur de végétation en période de déficit herbager (automne et hiver) sont des caractères distinctifs entre les divers géotypes sélectionnés. Le sulla S1L10 a été classé comme un géotype à pouvoir d'installation rapide; il a pu être coupé en hiver avec plus de 4 t/ha de matière sèche. En cette même période (janvier), Sgaravatti n'avait produit que 1,2 t/ha de matière sèche.

Au cours de la campagne agricole 2000-2001 caractérisée par un déficit pluviométrique de -220 mm par rapport à la moyenne normale, S1L10 avait eu une production moyenne hivernale (04 janvier 2001), de 25,3 t/ha de fourrage frais soit l'équivalent de 2,9 t/ha de matière sèche. Au cours de la deuxième année, les premières pluies automnales (septembre) ont entraîné une repousse rapide et précoce, favorisant ainsi une végétation d'une hauteur variant de 35 à 50 cm à partir de mi-novembre (Ben Jeddi, 2002). En cette même période, Sgaravatti a produit trois fois moins de fourrage que S1L10. Cette particularité variétale du sulla dans le semi-aride joue un rôle important dans la mesure où l'offre de verdure en période automnale se trouve très insuffisante en quantité qu'en qualité. D'autres géotypes comme S7L7 ont la possibilité de fournir une biomasse sèche assez importante (> 8 t/ha) au cours de la première année et au stade bouton floral/floraison dépassant largement la production de Sgaravatti.

En Tunisie, la production fourragère dans les conditions plus ou moins difficiles des régions semi-arides représente actuellement une priorité pour les sélectionneurs. Le sulla S7L7 a présenté toutes les particularités pour s'adapter à ces conditions. Ce géotype est suivi par S1L10 qui avait un niveau de production supérieur à celui du témoin. Les mêmes conclusions ont été valables pour la production de matière sèche digestible. La moyenne la plus importante de deux années de production a été obtenue avec le géotype S7L7 (6,7 t/ha). Dans les mêmes conditions, le sulla Sgaravatti n'avait produit que 1,8 t/ha de matière sèche digestible. En milieu plus favorable (subhumide), l'effet sur les géotypes a été moins important que dans le semi-aride. La différence de production entre le sulla le plus performant S1L10 et Sgaravatti n'a été que de 1,2 t/ha.an

Dans un milieu où la pluviosité est très aléatoire, le rendement énergétique (UFL) des fourrages est considéré comme un paramètre de caractérisation variétale. Le total de deux années de production d'un sulla local S9L1 le moins performant a été de 1,5 fois celui du témoin (5304 contre 3638 UFL/ha soit 2652 contre 1819 UFL/ha.an). Cette supériorité obtenue encourage la promotion des ressources fourragères locales dans les régions marquées par un déficit alimentaire pour le bétail souvent chronique et qui représente certaines années 50 % des besoins totaux du cheptel tunisien (Zouaghi, 1998).

4. Actuellement, l'amélioration de la production des protéines d'origine végétale devient une nécessité surtout après l'apparition de problèmes liés à l'alimentation des ruminants par les farines animales. La culture des fabacées contribue à fournir une source protéique à moindre coût qui entraîne par conséquent une réduction des importations de tourteau de soja évaluées en Tunisie à plus de 500 000 t/an (M.A.E.R.H, 1998).

La sélection des sillas a permis de mettre au point des génotypes ayant une production totale de protéines supérieure à Sgaravatti d'au moins 0,2 t/ha. Cette production a pu augmenter avec S7L7 en atteignant 1,3 t/ha.an soit 3 fois plus que Sgaravatti.

La faiblesse de production du sulla témoin dans un milieu marqué par des stress climatiques (déficits pluviométriques automnal et printanier) a été confirmée par les tests de germination des sillas dans divers milieux à stress hydrique simulé par le PEG (poly-éthylène glycol). En effet, le témoin a été classé sensible au stress hydrique. Alors que, S7L7 a continué à germer jusqu'à -7 bars avec 23 % de germes. Cet acquis représente un outil de travail pour la mise au point d'un matériel génétique qui supporte mieux le déficit hydrique en phase critique du cycle de développement de la plante.

Durabilité des systèmes de rotation à *Hedysarum coronarium* L.

5. Le sulla du nord peut avant tout occuper certaines terres mises ou laissées en jachère une année sur deux et même plus et qui représentent annuellement près de 315 000 ha se trouvant en zone septentrionale nord de la dorsale tunisienne (M.A.E.R.H, 1996). Dans cette zone, les systèmes de rotation sulla/céréale peuvent substituer le système basé sur la jachère. L'irrégularité des pluies ne peut pas être considérée comme une nouveauté. Mais, surtout la mauvaise gestion des terres avec des systèmes de culture mal adaptés ont fait que l'effet sécheresse est beaucoup plus ressenti actuellement que dans le temps.

Les cultures fourragères qui représentent seulement 7 % des emblavures annuelles avec une monoculture céréalière (*Avena sativa* L./*Triticum durum* Desf./*Hordeum vulgare* L.) forment déjà des éléments de non-intégration de l'élevage dans les exploitations agricoles. Cette situation est devenue malheureusement désastreuse dans la majorité des régions où l'agriculture a perdu son visage diversifié et s'est transformée en fournisseur principalement de céréale. Ces cultures en temps que produit stratégique doivent être améliorées non pas au détriment d'autres spéculations agricoles comme les fourrages ou bien les pâturages mais dans un contexte cultural équilibré qui prévaut d'avantage la monoculture.

Dans les régions où jadis le sulla du nord couvrait spontanément toutes les terres marneuses (Thiault, 1957) et qui représentent actuellement la majorité des emblavures céréalières du nord de la dorsale tunisienne, la mise en rotation des céréales avec des cultures fourragères comme le sulla entre autres permet de corriger sensiblement la situation.

5. 1. Dans le semi-aride, l'amélioration des taux de matière organique des sols dans les rotations avec une culture bisannuelle de sulla a été une première preuve de l'intérêt des fabacées fourragères dans la diversification des systèmes de rotation. En dix années (1990-1999), le gain de matière organique a été de 0,9 % par rapport à un blé continu qui au contraire a entraîné une dégradation du sol suite à une perte de 0,1 %. Après 20 ans, ce système pourra faire augmenter le taux de matière organique des sols à un niveau proche de 3 %.

Cette amélioration est bénéfique, vu qu'elle favorise une meilleure efficacité d'utilisation de l'eau des pluies ou de l'irrigation par les cultures. En même temps, l'introduction du sulla a entraîné la restitution au sol d'une quantité d'azote non négligeable qui peut dépasser 200 kg/ha après deux années de culture. Cet apport d'azote organique peut réduire ou même annuler l'apport de l'azote chimique pour la céréale suivante. Ainsi, la future contribution des fabacées fourragères dans les systèmes de rotation devrait constituer un guide permettant d'anticiper les corrections à apporter aux minéraux comme l'azote ou autres éléments (Dulphy *et al.*, 2002).

5. 2. Entre 1990 et 1999, le rendement du blé dur Karim dans une rotation à base de sulla bisannuelle s'est trouvé à un niveau supérieur que le blé en continu qui recevait 110 à 120 kg/ha d'azote. La production en grains du blé a atteint 5,7 t/ha.an dans le système SSBC contre 4,1 t/ha.an dans la monoculture BBBB. Il en découle ainsi un gain azoté à enregistrer sur le blé dans les systèmes de rotation à sulla. Cette différence est suffisamment importante pour justifier l'intérêt environnemental de la fixation symbiotique de l'azote par les fabacées fourragères dans les systèmes de rotation avec les céréales. La complémentarité qui doit exister entre les diverses cultures de la rotation devrait par conséquent diminuer les coûts d'intrants surtout en engrais chimique.

5. 3. Les systèmes de rotation diversifiés n'ont pas été bénéfiques seulement pour le sol ou bien le rendement en grains du blé, mais leur potentiel fourrager a pu sécuriser les rendements annuels du système au niveau de l'exploitation agricole. Dans un système à base de sulla, la moyenne productive du sulla a été de 7436 UFL/ha.an et 1516 kg/ha.an de protéines brutes représentant l'équivalent des besoins en fourrage de deux vaches laitières. Dans ce système, la diminution des apports protéiques sous forme de tourteau de soja peut être considérée comme un des meilleurs acquis de la rotation.

L'impact positif des systèmes de rotation sur l'environnement immédiat des cultures est considéré non pas seulement comme une conséquence directe de l'introduction des fabacées fourragères mais indirectement, par la présence d'animaux qui devraient être sur place afin d'alimenter le système en fertilisant biologique sous forme de fumier. Dans une perspective d'agriculture durable, à travers les systèmes de rotation basés sur la culture du sulla, la diversification avec la durabilité des productions obtenues seraient la meilleure remède à une agriculture aléatoire mais surtout fragile face aux conjonctures économiques actuelles.

BIBLIOGRAPHIE

- Abdelguerfi, A. (1989) Quelques réflexions sur la situation fourragère et pastorale en Algérie. *In*. "Constitution de réseaux thématiques de recherche agricole au Maghreb". (A. Birouk, A. Ouhsine, et. T. E. Améziane, eds.) Rabat, Maroc, 75-78.
- Abou Akkada, A. R. (1988) Farming systems producing livestock in mediterranean areas. 165-178. *In*. "The role of legumes in the farming systems of the mediterranean areas" (A. E. Osman., M. H. Ibrahim, et M. A. Jones, eds.) Proceedings of a workshop on the role of legumes in the farming systems of the Mediterranean areas. UNDP/ICARDA, Tunis, Tunisia, june 20-24, 1988.
- AFNOR. (1983) Soils quality-Determination of total organic carbon by sulfochromic oxidation. *In*. "afnor", 83274.
- Al Faiez, C., Birouk, A., Derkaoui, M., et Tazi, M. (1990) Le patrimoine génétique fourrager et pastoral du Maroc. Les acquis et les perspectives. Séminaire maghrébin sur les productions fourragères et pastorales. Kairouan, Tunisie, 15-19 mai 1990, 13 p.
- Allen, D. N. et Allen, E. K. (1981) The Leguminosae. University of Wisconsin Press, 324-325.
- Allen, T. H., Reeves, D. W., et Mulvaney, R. L. (1996) Winter legume cover crop benefits to corn: rotation vs. fixed-nitrogen effects. *Agronomy Journal* **88**, 527-535.
- Altieri, M. A. (1991) How best can we use biodiversity in agro-ecosystem? *Out look on agriculture* **20**, 15-23.
- Ambolet, B. (1986) Dans quelles conditions la monoculture du Blé est-elle possible. *In*. "Les rotations céréalières intensives. Dix années d'études concertées", INRA-ONIC-ITCF. 1973-1983. INRA, Paris, 1986, 427-444.
- Ameziane, T. E. et Berkat, O. (1989) Production Fourragère et pastorale au Maroc: bilan succinct des acquis et orientation des recherches. *In*. "Constitution de réseaux thématiques de recherche agricole au Maghreb". (A. Birouk, A. Ouhsine, et. T. E. Améziane, eds.) Rabat, Maroc, 83-87.
- Angers, D. A. et Mehuys, G. R. (1988) Effects of cropping on macro-aggregation of a marine clay soil. *Canadian Journal of Soil Science* **68**, 723-732.
- Angus, J. F., Van Herwaarden, A. F., et Howe, G. N. (1991) Productivity and break crop effects of winter-growing oilseeds. *Australian Journal of Experimental Agriculture* **31**, 669-677.
- Anon, (1990) Soybean seed quality and storage. *In*. "Asian vegetable research and development center". Taiwan, 376-381.
- APG. (1998) An ordinal classification for the families of flowering plants. *Annals of the missouri botanical garden* **85**, 531-553.
- Attonaty, J. M. (1980) Qu'est ce que le système fourrager? *In*. "Perspectives agricoles" numéro spécial système fourrager, 20-27.
- Baatout, H., Boussaïd, M., Combes, D., Espagnac, H., et Figier, J. (1976) Contribution à la connaissance du genre *Hedysarum* en Tunisie. *Bulletin de la Société des Sciences Naturelles de Tunisie* **t.11**, 87-95.
- Baccouche, M. (1998) Le système fourrager de l'Agro-combinat Ghézala: étude technique et proposition d'amélioration. *Mémoire de Fin d'études du Cycle de Spécialisation. INA Tunisie*, 98p.

- Badaruddin, M. et Meyer, D. W. (1989) Forage legume effects on soil nitrogen and grain yield, and nitrogen of wheat. *Agronomy Journal* **81**, 419-124.
- Badaruddin, M. et Meyer D. W. (1994) Grain legume effects on soil nitrogen, grain yield, and nitrogen nutrition of wheat. *Crop Science* **34**, 1304-1309.
- Baker, R. J. (1988) Test for cross over genotype-environment interactions. *Canadian Journal Plant Science* **68**, 405-410.
- Ballard, L. A. T. (1973) Physical barrier to germination. *Seed Science and Technology* **1**, 285-303.
- Ballatore, G. P. (1963) La coltivazione della sulla: le sulla en Tunisie In. "L'Informateur agrario ", Verona, Italie, 741
- Ballatore, G. P. (1972) La produzione foraggera negli ambienti semiaridi, con particolare riferimento alla Sicilia. *L'informatore. Agrario* **27**, 7433-7464.
- Barbottin, A. (2004) Utilisation d'un modèle de culture pour évaluer le comportement des génotypes: pertinence de l'utilisation d'azodyn pour analyser la variabilité du rendement et de la teneur en protéines du blé tendre. *Thèse de Doctorat INAPG France*, 237p.
- Barnett, J. P. (1991) Relating the seed coat of *Pinus* to speed of germination, geographic variation and seedling development. In "Proceedings of the 21st southern forest tree improvement, June 17-20 1991. Knoxville, Tennessee", 266-275.
- Bassendowski, K. A., Dren Smith, J., et Howarth, R. E. (1989) The potential value of *Hedysarum alpinum* var. *americanum* as a forage legume for the northern canadian prairies. *Canadian Journal of Plant Science* **69** 815-822.
- Bassford, K. E. et Cooper, M. (1998) Genotype x environment interactions and some considerations of their implications for wheat breeding in Australia. *Australian Journal of agricultural Research* **49**, 153-174.
- Behaeghe, T. et Blouard, R. (1969) Amélioration des semences et sélection des plantes prairiales au Congo, au Rwanda et au Burundi. *Extrait du bulletin d'information de l'INEAC* **XI**, 4-6.
- BelKhoja, K., Bortoli, L., Cointepas, J. P., Dimanche, P., Foiurnet, A., Jacquinet, J. C., et Mori, A. (1973) Les sols de Tunisie septentrionale. In "Sols de Tunisie. 5. D.R.E.S, Division des sols", 185p.
- Bellon, S.; Girard, N., et Guerin, G. (1999) Caractériser les saisons-pratiques pour comprendre l'organisation d'une campagne de pâturage. *Fourrages* **158**, 115-132.
- Ben Emna, M. (1991) Analyse du système fourrager de l'agrocombinat El Alem et perspectives d'amélioration. *Mémoire de fin d'études du cycle de spécialisation de l'INA Tunisie*, 136p.
- Ben Jeddi, F. (1986) Accroissement des ressources fourragères et amélioration de l'efficacité énergétique des cultures par les associations graminées-légumineuses en zone semi-aride inférieure. *Mémoire de Fin d'Etudes du Cycle de Spécialisation de l'INA Tunisie*, 138p.

Bibliographie

- Ben Jeddi, F., Zouaghi M., Harrabi, M., Strobel, G. A., et. Hannaway, D. B. (1989) Nodulation of *Lupinus albus* and *Vicia faba* by *Rhizobium* spp. as influenced by *Agrobacterium rhizogenes*. *FEMS Microbiology* **59**, 77-82.
- Ben Jeddi, F., Zouaghi, M., et Moujahed, N. (1992) Qualité et productivité de neuf variétés de ray-grass annuel (*Lolium multiflorum* Lam.). *Revue de l'I.N.A. Tunisie* **7**, 59-72.
- Ben Jeddi, F. (1996) Le sulla ensilage: possibilités et limites. Journée d'information sur les ensilages. In "Ministère de l'Agriculture. IRESA. Pôle de développement du Nord-Ouest", Bousalem, 28 mars 1996.
- Ben Jeddi, F., Zouaghi, M., et Behaeghe, T. (1998) Le sulla sauvage: biodiversité et création variétale. In "Actes du premier séminaire international sur la mobilisation, l'exploitation et la conservation des ressources naturelles", 387-397.
- Ben Jeddi, F. (2001) Description et spécificité variétales du sulla Bikra 21. Journée d'étude sur les nouveautés dans le domaine de la recherche scientifique: l'amélioration du sulla local source durable pour l'alimentation animale. INAT-CCSPS. ESIER Mjez El Beb, Tunisie, 05 avril 2001.
- Ben Jeddi, F. (2002) Installation et conduite des cultures fourragères hivernales. In. "Journée d'information sur les cultures fourragères hivernales". Ministère de l'Agriculture, de l'Environnement et des Ressources Hydrauliques: CTC, Bousalem, 23 Octobre 2002.
- Ben Jeddi, F. (2004) Amélioration du sulla du nord spontané: création variétale et progrès génétiques réalisés. In "1^{ère} session de formation des ingénieurs du nord sur le sulla Bikra 21 dans les systèmes de cultures", Ministère de l'Agriculture, de l'Environnement et des Ressources Hydrauliques-DGPA., Sidi Thabet 29 mars-02 avril 2004.
- Benson, G. O. (1985) Why the reduced yields when corn follows corn and possible management responses? In. "Proceedings 40th annual corn and sorghum research conference". (D. Wilkinson, ed.) Chicago, IL. 11-12 Dec. 1985. Am. Seed Trade Assoc., Washington. DC, 161-174.
- Bentham, G. et Hooker, J. D. (1865) *Genera Plantarum*, 1-40. London Reeve.
- Beranger, C. et Cossee, B. (1998) L'agriculture durable. Une réalisation: les plans de développement durable. *Fourrages* **154**, 211-216.
- Bewley, J. D. et Black, M. (1985) *Physiology of development and germination*. (New York: plenum press ed.), 367p.
- Biarnes-Dumoulin, V., Denis, J. B., Lejeune-Henaut, I., et. Eteve, G. (1996) Interpreting yield instability in pea using genotypic and environmental covariates. *Crop Science* **36**, 115-120.
- Bigot, A., Floret, C., Guillerm, J. L., Jacquinet, J. C., et Soler, A. (1967) Carte phyto-écologique de la Tunisie septentrionale: Bizerte-Tunis. *Annales de l'Institut National de la Recherche Agronomique de Tunisie* **40**, Fasc. 1.
- Bigourdan, R. (1933) La culture du sulla. *La Tunisie agricole* **10**, 156-160.

- Bishnoi, U. R. et Delouche, J. C. (1980) Relationship of vigor tests and seed lots to cotton seedling establishment. *Seed Science and technology* **8**, 341-346.
- Blevins, R. L., Thomas, G. W., et Cornelins, F. L. (1977) Influence of no-tillage and nitrogen fertilization on certain soil properties after 5 years of continuous corn. *Agronomy Journal* **69**, 383-386.
- Bœuf, F. et Tournieroux, A. (1904) "Culture des plantes fourragères à l'École coloniale d'agriculture de Tunis de 1898 à 1904". Bulletin de la Direction de l'Agriculture et du Commerce. (Imprimerie-Papeterie Moderne ed.), Tunis, 525-538.
- Boiffin, J. et Fleury, A. (1974) Quelques conséquences agronomiques du retournement des prairies permanentes. *Annales Agronomiques* **25**, 555-573.
- Bolton, H. Jr., Elliot, L. F., Papendick R. I., et Bezdicek, D. F. (1985) Soil microbial biomass and selected soil enzyme activities: effect of fertilization and cropping practices. *Soil Biology and Biochemistry* **17**, 297-302.
- Bonnet, E. D. et Barrate, G. (1896) Catalogue raisonné des plantes vasculaires de la Tunisie. (Imp. Nat. Paris ed.), 138-139.
- Bortolli, L., Gounot, M., et Jaquiot, J. C. I. (1967) Climatologie et bioclimatologie de la Tunisie septentrionale. *Ann. Ins. Rech. Agron. Tunisie* **42**, 1-235.
- Boulahia, S. (1990) Le pois protéagineux. *Mémoire de Fin d'Etudes du Second Cycle. INA Tunisie*, 82p.
- Boydston, R. A. (1989) Germination and emergence of long spine sandbur (*Cenchrus longispinus*). *Weed Science* **37**, 63-67.
- Brau-Nogue, C. (1996) Dynamique des pelouses d'alpage laitiers des alpes du nord externe. *Thèse de Doctorat. Université J. Fourier. Grenoble*, 187p.
- Breese, E. L. (1989) Regeneration and multiplication of germplasm resources in seed gene banks. In "The scientific background". Rome international board for plant genetic resources.
- Bremner, J. M. (1965) Total nitrogen. In "Methods of soil analysis". Part 2. *Am. Soc. Agron.* **9**, 1149-1176.
- Brundtland, G. H. (1987) Our common future. In. "the world commission on environment and development". (Oxford University Press, ed.), 383p.
- Bruuselma, T. W. et Christie, B. R. (1987) Nitrogen contribution to succeeding corn from alfalfa and red clover. *Agronomy Journal* **79**, 96-100.
- Burt, R. L., Isbell, R., et Williams, W. T. (1979) Strategy of evaluation of a collection of tropical herbaceous legumes from Brazil and Venezuela. I. In "Ecological evaluation at the point of collection agro-ecosystems" **5**, 99-117.
- Casler, M. D. (1990) Cultivar and cultivar x environment effects on relative feed value of temperate perennial grasses. *Crop science* **30**, 722-728.
- Casler, M. D. et Hovin, A. W. (1984) Genotype x environment interaction for reed canary grass forage yield. *Crop Science* **24**, 633-636.
- Cassman, K. G., Bryant, D. C., Fulton, A. E., et Jackson, L. F. (1992) Nitrogen supply effects on partitioning of dry matter and nitrogen to grain of irrigated wheat. *Crop Science* **32**, 1251-1258.

- Catalan, L., Balzarini, Z., Talesnik, E., Sereno, R., et Karlin, U. (1994) Effects of salinity on germination and seedling growth of *Prosopis flexuosa* (D.C.). *Forest Ecology and Management* **63**, 347-357.
- CETIOM. (2003) Effets précédents des cultures du genre *Brassica* (moutarde, colza) vis-à-vis des céréales (maïs, blé) et du pois. In. "Maîtrise de l'allélopathie de leurs résidus avec crucifères et pois". Dossier n° : 01/01-1. Rapport final.
- Chaillat, I. (2001) Féverole: un intérêt confirmé. ITCF, France.
- Charmley, E. et Veira, D. M. (1991) The effect of heat treatment and gamma radiation on the composition of unwitted lucerne silage. *Grass and forage Science* **45**, 381-390.
- Charrier, A., Lourd, M., et Pernes, J. (1984) La conservation des ressources génétiques. In "Gestion des ressources génétiques des plantes", Tome II. Manuel, Agence de coopération culturelle et technique. (Tec. et Doc. Lavoisier, ed.), 190-233.
- Chartterton, B. et Chartterton, L. (1991) Medic seed production in Tunisia. *Agricultural systems* **37**, 77-85.
- Cherney, J. H. et Volenec, J. J. (1992) Forage evaluation as influenced by environmental replication: a review. *Crop science* **32**, 841-846.
- Chriki, A. (1982) Analyse génétique et biochimique de la pigmentation florale chez *Hedysarum coronarium* L. *Thèse de Doctorat de 3ème cycle. Faculté des Sciences de Tunis*, 93p.
- Chriki, A. (1990) The genetic control of anthocyanin 5' hydroxylation in flowers of *Hedysarum coronarium* L. and *Hedysarum capitatum* Desf, Asch et Gr. *Agronomie* **10**, 533-540.
- Christensen, N. B., Lindemann, W. C., Salazar-Sosa, E., et Gill, L. R. (1994) Nitrogen and carbon dynamics in no-till and stubble mulch tillage systems. *Agronomy Journal* **86**, 298-303.
- Clarde, C. (1990) Les adventices des cultures méditerranéennes en Tunisie: leurs plantules, leurs semences. Ministère de l'Agriculture, Tunisie/AGCD, Belgique. *Publication agricole* **26**, 246-247.
- Clarholm, M. (1989) Effects of plant-bacterial-amoebal interactions on plant uptake of nitrogen under field conditions. *Biology and Fertility of Soils* **8**, 373-378.
- Clement, R. J. et Ludlow, M. M. (1977) Frost avoidance and frost resistance in *Centrosema virginianum*. *Journal of applied ecology* **14**, 551-566.
- Coïc, Y. 1956. La nutrition et la fertilisation azotée du blé d'hiver. *Annales Agronomiques* **21**, 115- 131.
- Colbach, N., Lucas, P., et Cavelier, N. (1994) Influence des successions culturales sur les maladies du pied et des racines du blé d'hiver. *Agronomie* **14**, 525-540.
- Cooper, M. et Hammer G. L. (1996) Plant adaptation and crop improvement. CAB International: Walling-ford, UK.

Bibliographie

- Cottenie, A., Velghe, G., Verloo, M., et Kiekens, L. (1979) Analytical methods for plants and soils analysis. State University Gent (Belgique) 39p.
- Cowell, L. E. et Doyle, P. J. (1993) "Crop nutrients and the environment" 474-527. (D. A. Rennie, *et al.*, eds.). Impact of macronutrients on crop responses and environmental sustainability on the canadian prairies. Can. Soc. Soil Sci., Ottawa, ON.
- Creech, J. L. et Reitz P. L. (1971) Plant germplasm now and for tomorrow. *Advances in Agronomy* **23**, 1-49.
- Dale, M. F. (1991) The use of genetic resources in breeding and breeding research. *Biological of the Linnean Society* **43**, 34-49.
- Daniellie, P. (1975) Analyse statistique à plusieurs variables. In "Presses Agron." Gembloux, 61-63.
- De Goyou, B. (1996) La certification des plantes fourragères. *Fourrages* **148**, 407-416.
- De Jong, J. J. (1961) Distribution et commerce des semences. In "Semences agricoles et horticoles". FAO. Rome, 160-173.
- De La Prière, R. A. (1989). La révolution des semences pourrait. In "Situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture". FAO Agriculture **21**, 161p.
- Delas, J. et Molot C. (1983) Effet de divers amendements organiques sur les rendements du maïs et de la pomme de terre, cultivés en sols sableux. *Agronomie* **3**, 19-26.
- DeLouche, J. C. (1979) Préparation de programmes semenciers. In "Production de semences améliorées". FAO. Rome, 66-79.
- Dell'Aquila, A. et Di Turi, M. (1996) The germination response to heat and salt stress in evaluating vigor loss in aged wheat seeds. *Seed Science and Technology* **24**, 309-319.
- Delphin, J. E. et Conesa, A. Ph. (1979) Evolution de la matière organique du sol d'un essai rotation, irrigation, restitution des pailles. I. Etat des réserves organiques. *Annales Agronomiques* **30**, 167-178.
- Delphin, J. E. (1989) Etat organique du sol selon quelques systèmes de culture en Alsace. In. "Fertilité et système de production". INRA, Paris, France, 249-257.
- Dhubert, F. (2004) Actualité des protéagineux. *Bulletin bi-mensuel*, UNIP, France.
- Dick, W. A., Van Doren, Jr. D. M., Triplett, Jr. G. N., et Henry, J. E. (1986) Influence of long-term tillage and rotation combinations on crop yields and selected soil parameters. 1. Results obtained for a mollic Ochraqualf soil. In. "Research bulletin", 1180. Ohio Agric. Res. and Dev. Center, Ohio State University.
- Diz, D. A. et Schank, S. C. (1995) Heritabilities, genetic parameters, and response to selection in Pearl Millet x Elephant grass hexaploid hybrids. *Crop Science*, **35**, 95-101.
- Donald, L. P., Smith, N. J. H., Williams, J. T., et Anishetty, N. M. (1990) "Banques de gènes et alimentation mondiale". (INRA et Economica, eds.), 217p.

- Doran, J. W. et Parkin, T. B. (1994) "Defining and assessing soil quality". (Doran, J. W. *et al.*, eds.). Defining soil quality for sustainable environment. SSSA Spec. Publ. 35. ASA and SSSA, Madison, WI.
- Douglas, G. B., Stienezen, M., Waghorn, G. C., et Foote, A. G., (1999) Effect of condensed tannins in birdsfoot trefoil (*Lotus corniculatus* L.) and sulla (*Hedysarum coronarium* L.) on body weight, carcass fat depth and wool growth of lamb in New Zealand. *New Zealand Journal of agricultural research* **42**, 55-64.
- Ducellier, L. (1919) Les pâturages du Maroc. In "Considérations générales sur l'amélioration de la production fourragère dans l'Afrique du Nord". (Imp. Algérienne, ed.), 52p.
- Dulmet, F. L. (1980) Amélioration génétique et production de semences. In "La terre d'Oc d'agriculture". 2^{ème} trimestre, 26-57.
- Dulphy, J. P., Millord, F., et Benoit, M. (2002) Etude de la production et de la valeur des prairies naturelles conduites en agriculture biologique en Auvergne: premiers résultats. *Fourrages* **172**, 405-408.
- Dumont, H. (1967) Qualification agronomique des terres. ISEA. Tunisie.
- Duru, M., Chaurand, M. C., Foucras, J., et Weber, M. (1999) Le volume d'herbe disponible par vache: un indicateur pour la conduite du pâturage tournant en élevage laitier. *Fourrages* **157**, 47-62.
- Ebelhart, S. A. et Russel, W. A. (1966) Stability parameters for comparing varieties. *Crop Science* **6**, 36-40.
- Ebelhart, S. A., Frye, W. W., et Blevins, R. L. (1984) Nitrogen from legume cover crops for no-tillage corn. *Agronomy Journal* **76**, 51-55.
- Ehrlich, P. et Ehrlich, A. (1983) Extinction: The causes and consequences of the disappearance of species. Ballantine Books, New York.
- Eira, M. T. S. et Caldas, L. S. (2000) Seed dormancy and germination as concurrent processes. *Brasilian Journal of Plant Physiology* **12**, 85-103.
- El Mili, T. (1983) Modification de la production de semences de la luzerne de Gabès par le bore et les insectes pollinisateurs. *Mémoire du cycle de spécialisation de l'I.N.A. Tunisie*, 130p.
- Ellis, R. H., Hong, T. D., et Roberts, E. H. (1989) A comparison of the low moisture content and longevity. *Annals of botany* **61**, 405-508.
- Ellis, R. H., Hong, T. D., Astley, D., Pinnegar, A. E., et Kraak, H. L. (1996) Survival of dry and ultra-dry seeds of carrot, groundnut, lettuce, oilseed rape and onion during five years hermetic storage at two temperatures. *Seed Science and Technology* **24**, 347-358.
- Emile, J. C., Mauries, M., Allard, G., et Guy, P. (1997) Genetic variation in the feeding value of alfalfa genotypes evaluated from experiments with dairy cows. *Agronomie* **17**, 119-125.
- Endres, C. S. (1990) Stability and selection response for digestibility of stems in divergent alfalfa populations. Ph. D. diss. Univ. of Wisconsin, Madison (Diss. Abstr. Intl. DA 9030789).

- Engels, J. M. M., Arora, R. K., et Guarino, L. (1995) "An introduction to plant germplasm exploration and collecting: planning, methods and procedures, follow-up". Collecting plant genetic diversity. (L. Guarino, V. Ramanatha Rao, et R. Reid, eds.). CAB International, 748 p.
- Evans, J. O., O'Connor, G. E., Turner, G. L., Coventry, D. R., Fettel, N., Mahoney, J., Armstrong, E. L., et Walsgott, D. N. (1989) N₂ fixation and its value to soil increase in lupin, field pea and other legumes in south-eastern Australia. *Australian Journal of Agricultural Research* **40**, 791-805.
- Evenari, M. (1949) Germination inhibitors. *Botanic review*. **15**, 153-194.
- Eyal, Z. et Levy, E. (1987) Variations in pathogenecity patterns of *Mycosphaerella graminicola* within *Triticum* spp. in Israel. *Euphytica* **36**, 237-250.
- Fahad, A. A., Mielke, L. N., Flowerday, A. D., et Swartzendruber, D. (1982) Soil physical properties as effected by soybean and other cropping sequences. *Soil Science of Society American Journal* **46**, 377-381.
- Fairey, D. T. et Lefkovitch, L. P. (1991) Hard seed content of alfalfa grow in Canada. *Canadian Journal of Plant Science* **71**, 437-444.
- Falconer, D. S. (1974) Introduction à la génétique quantitative. 86-116.
- Falconer, D. S. (1981) Introduction to quantitative genetics. Longman, London.
- Fehr, R. W. (1987) "Principles of cultivar development". (Theory and technique, ed.) Macmillan publishing company New York.
- Feldman, M. et Sears, E. M. (1981) The wild gene resources of wheat. In "American Scientist", 102-112.
- Fernandez, G. C. J. (1991) Analysis of genotype-environment interaction by stability estimates. *Hort. Science* **26**, 947-950.
- Ferrière, J. M., Fauveau, C., Chabanet, G., Stall, J., Hoffmann, M., Risoud, B., Farrugia, A., et Fortin, G. (1997) L'analyse énergétique à l'échelle de l'exploitation agricole. Méthodes, apports et limites. *Fourrages* **151**, 331-350.
- Finlay, K. W. et Wilkinson G. N. (1963) The analysis of adaptation in a plant breeding program. *Australian Journal of Agricultural Research* **14**, 724-742.
- Floret, C., Guillerm, J. L., Le Floc'h, E., et Soler, A. (1967a). Carte phyto-écologique de la Tunisie septentrionale: Tabarka-Souk El Arba. *Annales de l'Institut National de la recherche Agronomique de Tunisie* **40**, Fasc. 1.
- Floret, C., Guillerm, J. L., Jacquinet, J. C., et Soler, A. (1967b) Carte phyto-écologique de la Tunisie septentrionale: Maktar-Kairouan. *Annales de l'Institut National de la recherche Agronomique de Tunisie* **40**, Fasc. 2.
- Fluit, M. L. et Roberts, P. A. (1988) Using crop diversity to manage pest problems: some California examples. *Amer. J. Altern. Agri.* **3**, 164-167.
- Fobair, S. (1981) Rapport de la section de production de semences fourragères. Office de l'élevage et des pâturages, Tunisie.

Bibliographie

- Follet, R. F. et Schimel, D. S. (1989) Effect of tillage practices on microbial biomass dynamics. *Soil Science of Society American Journal* **53**, 1091-1096.
- FAO et IPGRI (1994) Gene bank Standards. Food and Agricultural Organization of the United Nations/International Plant Genetic Resources Institute, Rome.
- Foster B. Cady (1991) Experimental design and data management of rotation experiments. *Agronomy Journal* **83**, 50-56.
- Fowler, C. et Mooney, P. (1990) Shattering food, politics and the loss of gene diversity. University of Arizona Press. Tucson.
- FRAB. (2004) Informations sur les grandes cultures biologiques. Fédération régional des agriculteurs biologiques. *BIOCIVAM*, 1-6.
- François, L. E. (1994) Growth, seed yield, oil content of canola grown under saline conditions. *Agronomy Journal* **36**, 233-237.
- Free, J.B. (1993) Leguminosae: other Leguminosae. Insect pollination of crops 2^d edition. University of Wales, Cardiff, U. K. Academic Press Harcourt Brace Jovanovich, Publishers.
- Fryson, A. et Oaks, A. (1990) Growth promotion of maize by legume soils. *Plant soil* **122**, 259-266.
- Fu, S. M., Hampton, J. G., Hill, M. J., et Hill, K. A. (1996) Breaking hard seed of yellow and slender serradella (*Ornithopus compressus* and *O. pinnatus*) by sulphuric acid scarification. *Seed Science and Technology* **24**, 1-6.
- Fuchs, A. (1987) Effects of certain environmental factors on the growth and development of silver leaf nightshade. Phd. Thesis. Oklahoma state university.
- Gadgil, M. (1971) Dispersal: population consequences and evolution. *Ecology* **52**, 253-261.
- GAFTA. (1995) Methods of analysis. Form N°: 130. London, UK.
- Gagey, R. (1912) "Les plantes fourragères". (Soulivet Tunis, ed.), 30p
- Gallais, A. (1990) "Théorie de la sélection en amélioration des plantes". (Masson, ed.) 588p.
- Garber, R. J., Myers, W. M., et Sprague, V. G. (1946) Pastures and pasture problems in the northeastern states. *Pa. Agric. Exp. Stn. Bul.* **485**.
- Gammar, A. 1998. Flore terrestre du nord. "Monographie nationale de la Diversité biologique de la Tunisie". Ministère de l'Environnement et de l'Aménagement du Territoire. (La page infographique, ed.), 97-215.
- George, T., Ladha, J. K., Buresh, R. J., et Garrity, D. P. (1992) Managing native and legume-fixed nitrogen in lowland rice-based cropping systems. *Plant soil* **141**, 69-91.
- George, T., Ladha, J. K., Buresh, R. J., et Garrity, D. P. (1993) Nitrate dynamics during the aerobic soil phase in lowland rice-based cropping systems. *Soil Science and Society American Journal* **57**, 1526-1532.

Bibliographie

- George, T., Ladha, J. K., Garrity, D. P., et Buresh, R. J. (1994) Legumes as nitrate catch crops during the dry-to-wet transition in lowland rice cropping systems. *Agronomy Journal* **86**, 267-273.
- Gibon, A. (1981) Pratiques d'éleveurs et résultats d'élevages dans les Pyrénées centrales. Logique de la conduite des troupeaux et possibilités d'amélioration. *Thèse de Docteur Ingénieur. INA Paris*, 106p.
- Gibon, A., Duru, M., et Balent, G. (1983) Ajustements entre les besoins du troupeau et les rythmes de croissance de l'herbe. In "8^{èmes} Journées des recherches ovine et caprines", 343-380.
- GNIS. (1989) Pour avoir du vert en automne, le colza fourrage. *GNIS document* **1**, 1-7.
- Gounot, M., Guillermin, J. L., et Schoenenberger, A. (1966) Carte phyto-écologique de la Tunisie septentrionale: Cap-Bon-La Goulette-Sousse. *Annales de l'Institut National de la recherche Agronomique de Tunisie* **39**, Fasc. 5.
- Grainger, A. (1986) "Desertification". Earthscan publications, London.
- Granier, A. J. (1966) La culture en sec de la luzerne et du sulla. *Bulletin de l'Ecole nationale Supérieure de l'Agriculture de Tunis* **10**, 21-72.
- Gras, R. (1990) Systèmes de culture, définitions et concepts clés. In. "Les systèmes de culture". (Laurette Combe, D. Picard, eds.). INRA, Département d'Agronomie. Thiverval-Grignon, 196 p.
- Grimaldi, A. (1961) Osservazioni e ricerche morfobiologiche sopra la sulla (*Hedysarum coronarium* L.). *Ann. Fac. Agr. Perugia* **16**, 3-28.
- Groya, F. L. et Sheaffer, C. C. (1985) Nitrogen from forage legumes. Harvest and tillage effects. *Agronomy Journal* **77**, 105-109.
- Hampton, J., Lkahre, G., Van Gastel, A. J. G., Boyce, K. G., Leist, N., Wen-Shi, Wu., Loubser, W., et Van Der Burg, W. J. (1996) Quality seed from production to evaluation. *Seed Science and Technology* **24**, 393-407.
- Hamrouni, A. (1998) Phyto-écologie. In. "Monographie nationale de la diversité biologique". Ministère de l'Environnement et de l'Aménagement du Territoire. (La page infographique, ed.), 97-215.
- Hare, M. D. et Rolston, M. P. (1985) Scarification of *Lotus* seed. *Journal of Applied Seed Production* **3**, 6-11.
- Hargrove, W. L. (1986) Winter legumes as a nitrogen source for no-till grain *Sorghum*. *Agronomy Journal* **78**, 70-74.
- Harrington, G. T. 1916 Agricultural value of impermeable seeds. *Journal of Agricultural Research* **20**, 761-796.
- Havlin, J. L., Kissel, D. E., Maddux, L. D., Claasen, M. M., et Long, J. H. (1990) Crop rotation and tillage effects on soil organic carbon and nitrogen. *Soil Science of Society American Journal* **54**, 448-452.
- Hawkes, J. G. (1981) "Germplasm collection, preservation and use". 57-83. (K. J. Frey, ed.). Plant breeding II. Iowa. State University Press Washington, D. C.
- Hawkes, J. G. (1991) The importance of genetic resources in plant breeding. *Biological journal of the linnean society* **43**, 11-22.

Bibliographie

- Heenan, D. P., Taylor, A. C., Cullis, B. R., et Lill, W. J. (1994) Long term effects of rotation tillage and stubble management on wheat. Production in southern N/S/W/. *Australian Journal of agricultural research*. **45**, 93-117.
- Heichel, G. H. et Barnes, D. K. (1984) "Opportunities for meeting crop nitrogen needs from symbiotic nitrogen fixation". 49-59. (D. F. Bezdicek, J. F. Power, D. R. Keeny, et. M. J. Wright, eds.). Organic farming: Current technology and its role in a sustainable agriculture. ASA Spec. Publ. 46. ASA, CSSA et SSSA, Madison, WI.
- Hendersen, C. W. L. (1989) Lupin as a biological plough: evidence for and effects on wheat growth and yield. *Australian Journal and Experiment on Agriculture* **29**, 99-101.
- Henin, S. et Dupuis, M. (1945) essai de bilan de matière organique du sol. *Annales Agronomiques N^{elle} série*, 16-27.
- Hentgen, A. (1982) Une méthode pour améliorer la connaissance de la production disponible des surfaces herbagères au niveau national. *Fourrages* **92**, 15-50.
- Hesterman, O. B. (1988) "Exploiting forage legumes for nitrogen contribution in cropping systems". 155-166. (W. L. Hargrove, ed.) Cropping strategies for efficient use of water and nitrogen. ASA Spec. Publ. 51. ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI.
- Heydeker, W. (1972) "Vigor: viability of seeds". (E. H. Roberts, ed.). Syracuse, N. Y.: Syracuse University. press.
- Higgs, R. L., Peterson, A. E., et Paulson, W. H. (1990) Crop rotation. sustainable and profitable. *Journal of Soil and Water Conservation* **45**, 68-70.
- Holly, L. (1991) The principles of genetic maintenance of germplasm accessions during regeneration for self and open pollinated pasture, forage and food legumes. *In*. "Legume genetic resources for semi-arid temperate environments". ICARDA. 220-234.
- Hoyt, G. D. (1987) Legumes as a green manure in conservation tillage systems. *In*. "The role of legumes in conservation tillage". Soil and water conservation society. (J. F. Power, ed.), Ankeny, IA.
- Hudson, T., Kester, H. D. E., et Davies, Jr. F. T. (1990) "Plant propagation, principles and practices: principles of seed selection". (Prentic-Hall International, ed.). Inc. 77-93.
- Hyam, R. et Pankhurst R. (1995). Plants and their names. *In*. "A concise dictionary". Royal botanic garden Edinburgh. (Oxford University Press, ed.), 545p.
- INM. (1995) Données bioclimatiques par station météorologique. Institut national de la météorologie de Tunisie.
- INRA. (1980) Systèmes d'estimation et d'expression de la valeur énergétique des aliments. *In*. "Alimentation des ruminants". 64- 88. (INRA publications, ed.).
- ISTA. (1985) International rules for seed testing. *Seed Science and Technology* **13**, 299-355.
- ISTA. (1999) International rules for seed testing rules. *Seed Science and Technology* **27**, 333p.

- ITCF. (1987) La féverole de printemps: culture-utilisation. 32p.
- Izaurre, R. C., Juma, N. G., Mc Gill, W. B., Chanasyk, D. S., Pawluk, S., et Dudas, M. J. (1993) Performance of conventional and alternative cropping systems in cryoboreal subhumid central Alberta. *Journal of Agriculture and Science* **120**, 33-41.
- Jackson, T. W. (1962) Use of carbowaxes (polyethylene glycols) as osmotic agents. *Plant physiology* **37**, 512-529.
- Jacquinet, J. C. et Soler, A. 1967. Carte phyto-écologique de la Tunisie septentrionale: Kef-Thala-Feriana. *Annales de l'Institut National de la Recherche Agronomique de Tunisie*. **40**, Fasc. 2.
- Jalaluddin, M. D. et Harisson, S. A. (1993) Repeatability of stability statistics for grain yield in wheat. *Crop Science* **33**, 720-725.
- Jaritz, G. (1991) General principles in the evaluation of pasture and forage legumes. In. "Legume genetic resources for semi-arid temperate environments". ICARDA. 237-257.
- Jeffrey Mullahey, J., West, S. H., et Cornel, J. A. (1996) Effects of simulated drought by polyethylene glycol on bahiagrass germination. *Seed Science and Technology* **24**, 219-224.
- Jianhua, Z., Mc Donald, M. B., et Sweeney, P. M. (1996) Random amplified polymorphic DNA (RAPD) from seed of differing soy bean and maize genotypes. *Seed Science and Technology* **24**, 513-522.
- Johnson, J. W. (1976) Similarity indices II: the power of good significance test for the simple matching coefficient. In. "Technical report". Battelle pacific northwest labs, Richland, WA USA.
- Johnston, A. E. (1986) Soil organic matter, effects on soil and crops. *Soil Use Manage* **2**, 97-105.
- Jones, R. A. C. et Nicholas, D. A. (1992) Studies on alfalfa mosaic virus infection of burr medic (*Medicago polymorpha*) swards: Seed-borne infection, persistence, spread and effects on productivity. *Australian Journal of Agricultural Research* **43**, 697-715.
- Julier, B., Guy, P., Castillo-Acuna, C., Caubel, G., Ecalle, C., Esquibet, M., Furstoss, V., Hughe, C., Lavaud, C., Porcheron, A., Pracros, P., et Raynal, G. (1996) Genetic variability for pest resistance and forage quality in perennial diploid and tetraploid lucerne populations (*Medicago sativa* L.). *Euphytica* **91**, 241-250.
- Jussiaux, P. H. (1983) "Maïs hybride (grain/fourrage)". (La maison rustique, ed.). Paris, 21-28.
- Keeney, D. R. et Nelson D. W. (1982) "Nitrogen management for maximum efficiency and minimum pollution". 605-649. (J. F. Stevenson, ed.). Nitrogen in agricultural soils. *Agronomy Monography*. 22. ASA, CSSA et SSSA, Madison, WI.
- Khan, S. V. (1971) Nitrogen fraction in a gray wooded soil as influenced by long-term cropping systems and fertilizers. *Canadian Journal of soil Fertility*. Pergamon Press, New York.

- Khériji, O. (1999) Evaluation agronomique et fourragère de quelques géotypes améliorés du sulla du nord (*Hedysarum coronarium* L.). *Mémoire de fin d'études du cycle de spécialisation de l'I.N.A. Tunisie*, 93p.
- Knap, S. J., Ross, W. M., et Stroup, W. W. (1987) Precision of genetic variance and heritability estimates from *Sorghum* populations. *Crop Science* **27**, 265-268
- Kondra, Z. P., Campbell, D. C., et King, J. (1983) Temperature effects on germination of rapeseed (*Brassica napus* L.). *Canadian Journal of Plant Science* **35**. 835-842.
- Kpombrekou, A. K. et Tabatabai, M. A. (1997) Effect of cropping system on quantity/intensity relationships of soil phosphorus. *Soil Science* **162**; 56-68.
- Kranse, S., Weltzien, H., Mamluk, O., et Cocks, P. S. (1988) Yield decline in continuous cereal systems. 218-229. *In*. "Annual report 1987, pasture, forage and livestock program". ICARDA, Aleppo, Syria.
- Krishna, H., Kemp, P. D., et Newton, S. D. (1990) Necton, sulla, a preliminary evaluation. *Proceedings of the New Zealand grass land association* **52**, 157-159.
- Kristian Aase, J., Pikul, Jr. J. L., Prueger, J. H., et Hatfield, J. L. (1996) Lentil use and fallow loss in a semi-arid climate. *Agronomy Journal* **88**, 723-728.
- Lapeyronie, A. (1974) Caractères biologiques des espèces prairiales et fourragères en rapport avec leur utilisation. *In*. "Production Fourragère en Afrique du nord", 125p.
- Lapeyronie, A. (1982) "Les productions fourragères méditerranéennes: généralités, caractères botaniques et biologiques". (Maisonneuve g. p et la rose, eds.). Paris, France, 425 p.
- Laumont, P. 1949. le problème de l'affouragement dans les diverses régions de l'Afrique du Nord. *Alger* **1**, 14-18.
- Lavato, A. (1992) "Advances in research and technology of seeds". (Center for agricultural, ed.) Wageningen, Hollande.
- Le Houerou, H. N. (1965) "Forage and fuel plants in the arid zone of north Africa, the near and the middle east: plants for arid lands". (G. E. Wickens, J. R. Goodin, et D. V. Fields, eds.), 117-119.
- Leford-Buson, M., Hebert, Y., et Damerval, C. (1988) Les outils d'évaluation de la diversité génétique et phénotypique. *Agronomie* **8**, 173-178.
- Législation tunisienne. (1973) Loi relative au contrôle de la production et la commercialisation des semences. Ministère de l'Agriculture. DPA. Tunisie.
- Législation tunisienne. (1980) Arrêté du 03/11/80 fixant les conditions et les normes de contrôle de la production et de la commercialisation des semences des plantes fourragères. *Journal Officiel, Tunisie*.
- Lestander, T. (1988) Utveckling av utrustning för att avlägsna dött respektive skadat frö samt höja fröets gröningshastighet. *In*. "Improvement of equipment for seperating dead respective damaged seeds and upgrading germination rate". Sävar. Institutet för skogsförbättring. Intern. rapport, 198.

Bibliographie

- Leto, G., Stringi, L., Alicata, M. L., Ciaccone, P., Bonanno, A., et Amato, G. (1989) Nutritive value of *Hedysarum coronarium* L. in relation to phenological stage and utilization in semi-arid environment. *Informatore agrario* **45**, 49-55.
- Lockeretz, W. (1988) Open questions in sustainable agriculture. *Am. J. Altern. Agric.* **3**, 174-181.
- Longer, D. E. et Degago, Y. (1996) Field weathering potential of normal and hard seeded soybean genotypes. *Seed Science and Technology* **24**, 273-280.
- Loomis, R. S. et Connor, D. J. (1992) Crop ecology: productivity and management in agricultural systems. Cambridge Univ. Press, New York.
- Lopez-Bellido, L., Fuentes, M., Castillo, J. E., Lopez-Garrido, F. J., et Fernandez, E. J. (1996) Long term tillage, crop rotation, and nitrogen fertilizer effects on wheat yield under rainfed mediterranean conditions. *Agronomy Journal* **88**, 783-791.
- Louati, N. I., Louati, M., et Chriki, A. (2000) A quantitative study of some agronomic characters in sulla (*Hedysarum coronarium* L.). *Agronomie* **20**, 223-231.
- Lourd, M., Pernes, J., Savidan, Y., et Second, G. (1984) Evaluation. In. "Gestion des ressources génétiques des plantes". Tome II. (Manuel Tec. et Doc. Lavoisier, ed.), 136-189.
- Lovato, A. et Cagalli, S. (1992) Sugar beet (*Beta vulgaris* L.) seed vigor compared in laboratory and field tests. *Seed Science and Technology* **21**, 61-67.
- Lovato, M. B., Martins, P. S., et De Lemo Filho, J. P. (1994) Germination in *Stylosanthes humilis* populations in the presence of NaCl. *Australian Journal of Botany* **42**, 717-723.
- Lubet, E. et Juste, C. (1979) Effet de l'introduction d'une prairie temporaire, d'un engrais vert et de l'exportation des résidus de récolte sur les monocultures de maïs implantés dans les sols sablo-limoneux du sud des Landes. *CR Acad. Agric. Fr.* **65**, 295-309.
- MacDonald, M. B. (1988) Challenges in seed technology. In. "Proceeding 10th. Annual seed technology conference". (J. S Burris, ed.). Iowa state Univ. Ames, I. A., 11-32.
- Mackay, W. A., Davis, T. D., et Sankhla, D. (1995) Influence of scarification in temperature treatments on seed germination of *Lupinus havardii*. *Seed Science and Technology* **23**, 815-821.
- Mansour, A. (1997) Equilibre et productivité de l'association vesce-avoine, Evaluation agronomique de quelques génotypes d'avoine (*Avena sativa* L.). *Mémoire de Fin d'Etudes du Cycle de Spécialisation. INA Tunisie*, 100p.
- Mansour, M. M. F. (1994) Changes in growth, osmotic potential, and cell permeability of wheat cultivars under salt stress. *Biologia Plantarum* **36**, 429-434.

Bibliographie

- Marshall, D. R. et Brown, A. H. D. (1975) "Optimum sampling strategies in genetic conservation". (I O. H. Franke, et. J. G. Haxkes, eds.). Crop genetic resources for today and tomorrow, 53-80. Cambridge, Cambridge University Press.
- Marten, G. C. (1985) Factors influencing feeding value and effective utilization of forages for animal production. In. "Proceeding. XVth International Grassland. Congress" Kyoto, 89-97.
- Martiniello, P. (1992) Plant varieties and seeds. *Instituto sperimentale coltura foraggere* **5**, 71-81. Foggia. Italy.
- Martiniello, P. et Ciola, A. (1995) Dry matter and seed yield components in a mediterranean species. *Agronomy Journal* **87**, 985-993.
- Marty, J. R., Cabelguenne, M., et Puech, J. (1984) Perspectives de valorisation d'un milieu par des assolements de grandes cultures: essai d'optimisation technico-économique. I. Elaboration d'un modèle d'assolement. *Agronomie* **4**, 871-884.
- Massawe, F. J., Azam-Ali, S. N., et Roberts, J. A. (2003) The part of temperature on seed germination in Bambara groundnut (*Vigna subterranea* (L.) Verdc) landraces. *Seed Science and Technology* **31**, 259-273.
- Maymone, B., Tiberio, M., et Maziotti Di Celso, P. (1951) Chemical composition and feed value of *Hedysarum coronarium* L. In. "Conference for improvement of pasture and fodder product in the mediterranean area" Rome, 3-19.
- McEwen, J., Darby, R. J., Hewit, M. V., et Yeoman, D. P. (1989) Effects of field beans, fallow, lupins, oats, oilseed rape, peas, ryegrass, sunflowers and wheat on nitrogen residues in the soil and on the growth of a subsequent wheat crop. *Journal of agricultural Science* **115**, 209-219.
- McKirdy, S. J., Jones, R. A. C., Latham, L. J., et Coutts, B. A. (2000) Bean yellow mosaic poty-virus infection of alternative annual pasture forage, and cool season crop legume: susceptibility, sensitivity and seed transmission. *Plant soil* **51**, 325-346.
- McWilliam, J. R., Clemeents, R. J., et Dowling, P. M. (1970) Some factors influencing the germination and early seedling development of pasture plants. *Australian Journal of Agricultural Research* **21**, 19-32.
- Medvedev, V. D. (1981) Spring rape a good proceeding crop. *Herbage Abstract* **51**, 112.
- Meyer, D. W. (1987) Sweet clover: an alternative to fallow for set-aside acreage in eastern north Dakota. N. D. *Farm Research* **44**, 3-8.
- Michel, B. E. et Kaufmann M. R. (1973) The osmotic potential of polyethylene glycol 6000. *Plant physiology* **51**, 914-916.
- Miller, D. E. et Burke, D. W. (1983) Response of dry bean to daily deficit sprinkler irrigation. *Agronomy Journal* **75**, 775-778.
- Miller, P., Zenter, R., McConkey, B., Campell, C., Derksen, D., McDonald, C., et Waddington, J. (1998) Utilisation des cultures de légumineuses pour stimuler la protéine du blé dans la zone des terres brunes. Centre de recherches sur l'agriculture des prairies semi-arides. Saskatchewan, Canada.

Bibliographie

- Miller, S. D. et Dexter A. G. (1982) No-till crop production in the red river valley, ND. *Farm Research* **40**, 3-5.
- MAERH. (1996-1997-1998-1999-2002) Rapports annuels d'activité. Ministère de l'Agriculture de l'Environnement et des Ressources Hydrauliques, Direction générale de la production agricole. Département des grandes cultures. Tunis, Tunisie.
- Monnier, G. (1965) Action des matières organiques sur la stabilité structurale 1^{ère} partie. *Annales Agronomiques* **16**, 327-400.
- Monotti, M. et Parceddu, E. (1976) Evaluation of ecotype of sulla (*Hedysarum coronarium* L.) grown as spaced plants or sown in rows. *Rivista di Agronomia* **10**, 151-157.
- Moore, S. H. (1989) Weathring resistance of hard seed soybean cultivars. *Louisiana Agriculture* **32**, 17-19.
- Moore, S. H. (1991) Implications of the interaction between seed size and scarification on developing and conditioning hard seeded soybean. *Seed Science and Technology* **15**, 22-28.
- Moore, S. H. (2000) Using hard seed coats to preserve seed quality in soybeans. CSSA Special publication 31. Crop Science Society of America: MadisonWI 59-66.
- Moreno-Gonzalez, J. et Cubero, J. I. (1993) "Selection strategies and choice of breeding methods in plant breeding and prospects". (M. D. Hayward, N. O. Bosemark, and I. Romagosa, eds.) published by Chapman and Hall, London ISBN 0412433907.
- Morvan, T., Alard, V., et Ruiz, L. (2000) Intérêt environnemental de la betterave fourragère. *Fourrages* **163**, 315-322.
- Mouelhi, B. (2004) Simplification du travail du sol dans le système de rotation sulla-blé. *Projet de fin d'étude du cycle ingénieur de l'INA Tunisie*, 59p.
- Munns, R. et Termaat, A. (1986) Whole plant responses to salinity. *Australian Journal of plant Physiology* **13**, 143-160.
- NAL. (1992) Sulla (*Hedysarum coronarium* L.) variety Necton. New Zealand Agriseed Limited. *Plant breeding abstract* **62**, 287.
- Narjisse, H. (1990) "Les ressources sylvo-pastorales en milieu méditerranéen: l'élevage dans les systèmes céréaliers méditerranéen". (H. Narjisse, ed.), et A. Kabbli. Pudoc, Wageningen (Nether Land), 353-393.
- N'cib, R. (1991) Amélioration de la production de semences de bersim (*Trifolium alexandrinum* L.) en double exploitation fourrage/graines. *Mémoire du cycle de spécialisation de l'I.N.A. Tunisie*, 104p.
- Neffati, M., Akrimi, N., et Le Floc'h, E. (1993) Etudes des conditions de germination des espèces: une nécessité pour le succès des travaux de réhabilitation. *Ecologia Mediterranea* **XIX**, 1/2, 39-47.
- Neffati M. (1994) Caractérisation morpho-biologique de certaines espèces végétales nord-africaines. implications pour l'amélioration pastorale. *Thèse de Doctorat. faculté des Sciences Agronomiques et de biologie appliquée de Gent Belgique*, 264p.

Bibliographie

- Neily, M. H. (2000) Stratégie de lutte contre le brome: suivi de recommandations et possibilité de lutte biologique. *Projet de Fin d'Etudes de l'INA Tunisie*, 40p.
- Nelson, S. O., Stetson, L. E., et Works, D. W. (1968) Hard seed reduction in alfalfa by infrared and radio frequency electrical treatments. *Trans. ASAE* **11**, 728-730.
- Ney, B., Duthion, C., et Turc, O. (1994) Phenological response of pea to water stress during reproductive development. *Crop Science* **34**, 141-146.
- Nguyen, H. T., Sleper, D. A., et Hunt, K. L. (1980) Genotype x environment interactions and stability analysis for herbage yield of tall fescue synthetics. *Crop Science* **20**, 221-224.
- Norwood, C. 1994. Profile water distribution and grain yield as affected by cropping system and tillage. *Agronomy Journal* **86**, 558-563.
- Olson, R. A., Raun, W. R., Chun, Y. S., et Skopp, J. (1986) Nitrogen management and interseeding effects on irrigated corn and sorghum on soil strength. *Agronomy Journal* **78**, 856-862.
- ONU. (1992). Action 21. In. "Conférence sur l'environnement et le développement". Rio de Janeiro, Juin 1992, Chapitre 14.1 à 14.4.
- Orskov, E.R., De B. Hovell, F. D., et Mould, F. (1980) The use of the nylon bag technique for the evaluation of feed stuffs. *Tropical Animal Nutrition* **5**, 193-213.
- Oyer, L. J. et Touchton, J. T. (1990) Utilizing legume cropping systems to reduce nitrogen fertilizer requirements for conservation-tilled corn. *Agronomy Journal* **82**, 1123-1127.
- Painting, K. A., Perry, M. C., Denning, R. A., et Ayad, W. G. (1993) "A self teaching approach to the understanding analysis and development of genetic resources documentation". Guidebook for genetic resources documentation. (IBPGRI., ed.), 296p.
- Pengelly, B. C. et Eagles, D. A. (1995) Geographical distribution and diversity in a collection of the tropical legume macroptilium gracile (Poeppigia ex. Bentham) Urban. *Australian Journal of Agricultural Research* **46**, 569-580.
- Peoples, M. P., Herridge, D. F., et Ladha, J. K. (1995) Biological nitroge fixation: an efficient source of nitrogen for sustainable agricultural production. *Plant and Soil* **174**, 3-28.
- Perez-Alfocea, F., Estan, M. T., Caro, M., et Bolarin, M. C. (1993) Responses of tomato cultivars to salinity. *Plant and soil* **69**, 25-31.
- Piccioni, M. (1965) "Dictionnaire des aliments pour les animaux". Edagricole. (La maison rustique, ed.). Paris, France, 532-534.
- Pierce, F. J. et Rice, C. W. (1988) Crop rotation and its impact on efficiency of water and nitrogen use. p. 21-42. Cropping strategies for efficient use of water and nitrogen. (W. L. Hargrove, ed.). ASA. Spec. Publ. 15. ASA, CSSA and SSSA. Madison. WI.

Bibliographie

- Pimentel, D. et Murd. L. E. (1973) Food production and energy analysis. *Science* **182**, 443-449.
- Pinzanti, M. et Magnani, G. (1981) Ricerche comparative sull'impollinazione della sulla (*Hedysarum coronarium* L.) in diverse località toscane. *Agricoltura* **110**, 117-127.
- Poisson, C. (1992) "Les plantes fourragères: présentation générale et amélioration des espèces végétales cultivées, objectifs et critères de sélection". (INRA., ed.), 167-283.
- Poljakoff-Mayber, A., Somers, G. F., Werker, E., et Gallagher, J. L. (1994) Seeds of *Kosteletzkya virginica* (Malvaceae): their structure, germination and salt tolerance. *American Journal of Botany* **81**, 54-59.
- Polunin, O. 1969. Flowers of Europe. London, Oxford University Press New York, Toronto.
- Potter, R. L., Ueckert, D. N., Petersen, J. L., et McFarland, M. L. (1986) Germination of four wing saltbush seeds: interaction of temperature, osmotic and pH. *Journal of Range Management* **39**, 43-46.
- Prescott-Allen, R. et Prescott-Allen, C. (1982) The case for *in situ* conservation of crop genetic resource. *Nature and Resources* **18**, 15-20.
- Priestley, D. A. (1986) Seed agreeing. Cornell University Press. Ithaca.
- Prosperi, J. M. et Genier, G. (1996) Diversification des usages et diversité génétique: deux aspects complémentaires. *Fourrages* **147**, 261-271.
- Purvis, C. E. (1990) Differential response of wheat to retained crop stubbles. I. Effect of stubble type and degree of decomposition. *Australian Journal of Agricultural Research* **41**, 225-242.
- Quezel, P. et Santa, S. (1962) Nouvelle flore de l'Algérie et des régions désertiques méridionales. Tome 1 (CNRS., ed.), Paris-France, 539-541.
- Quinlivan, B. J. et Nicol, H. I. (1971) Embryo dormancy in subterranean clover seeds. *Australian Journal of Agricultural Research* **22**, 599-606.
- Rahmani, L. (1991) Tolérance à la salinité de la symbiose: *Hedysarum coronarium-Rhizobium leguminosarum*. DE A. Faculté des Sciences de Tunis, 64p.
- Raimbault, B. A. et Vyn, T. J. (1991) Crop rotation and tillage effects on corn growth and soil structural stability. *Agronomy Journal* **83**, 979-985.
- Raouf, K. (2002) Essai préliminaire de contrôle des adventices dans une culture de sulla du nord (*Hedysarum coronarium* L.). *Projet de fin d'études*. INA Tunisie, 57p.
- Reddy, V. D. M., Gowda, B. A., Reddy, V. T., et Paramesh, R. (1992) Season and stage of harvest on seed longevity in soybean. 835-838. In. "Workshop on Seeds". (Fourth International, ed.). Paris, ASFIS.
- Reed, K. F. M. M., Mathison, M. J., et Crawford, E. J. (1989) The adaptation, regeneration, and persistence of annual legumes in temperate pasture. In. "Persistence of forage legumes". Proceedings of a Trilateral Workshop Held in Honolulu, Hawaii, 18-22 July 1988. (G. C. Marten, et al., eds.). American Society of Agronomy: Madison, WI, USA.

Bibliographie

- Reeves, D. W. et Wood, C. W. (1994) "A sustainable winter legume conservation tillage system for maize: Effects on soil quality". 1011-1016. (H. E. Jensen, *et al.*, eds.). Proc. Int. Soil Tillage Res. Org. (ISTRO), 13th, Aalborg, Denmark. 24-29 July 1994.
- Rehman, S., Harris, P. J. C., Boourne, W. F., et Wilkins, J. (1997) The effect of sodium chloride on germination and the potassium and calcium contents of Acacia seeds. *Seed Science and Technology* **25**, 45-57.
- Remy, J. C. et Marin-Lafleche, A. (1974) L'analyse de terre. Réalisation d'un programme d'interprétation automatique. *Annales agronomiques* **25**, 607-632.
- Resk, D. V., Pereira, J., et Silva, J. E. (1991) Dinâmica da matéria orgânica na region dos Cerrados. Planaltina, DF, Brasil, Embrapa-CPAC. *Documento* **36**, 22p.
- Restuccia, G. (1975) Sowing density in the cultural technique of sulla (*Hedysarum coronarium* L.). *Rivista di agronomia* **9**, 338-341.
- Rios, S., Robledo, A., et Correal, E. (1992) Perennial pasture legumes of south-east Spain. *Herba* **5**, 68-76.
- Robertson, G. W. (1968) A biometeorological time scale for a cereal crop involving day and night temperature and photoperiod. *International Journal Biometeorology* **12**, 191-223.
- Robinson, R. G., Rabas, D. L., et Smith, J. (1984) Crop sequence effects of pulse crops and agronomic research on lupins. Minnesota Rep. Item AD-MR-2339. Univ. of Minnesota Agric. Exp. Stn.
- Rollier, M. (1968) Cultivar. *Mensuel agricole* **5**, 1-22.
- Rollins, R. C. (1940) Studies in the genus *Hedysarum* in north America. *Rhodora* **42**, (499), 217-239.
- Rondia, G., Dekker, A., Jabbar M., et Antoine, A. (1985) Produire plus de grains et de lait en Afrique du nord. Projet ferme modèle de Frétissa: rapport final. Publications agricoles n°: 5. Ministère de l'Agriculture de Tunisie et Administration Générale de la Coopération au Développement Belge. Bruxelles, 389p.
- Roos, E. E. (1989) Long term seed storage. *Plant breeding reviews* **7**, 129-158.
- Rottili, P. (1979) Contribution à la mise au point d'une méthode de sélection de la luzerne prenant en compte les effets d'interférence entre les individus. I. Etude expérimentale de la structure de la luzernière. *Annales de l'Amélioration des Plantes* **29**, 353-381.
- Rowland, I. C., Mason, M. G., et Hamblin, J. (1986) Effects of lupin on soil fertility. In. "Proc. 4th int. Lupin Conf." Geraldton, 96-111.
- Royo, C., Insa, J., Boujenna, A., Ramos, J. M., Montesinos, E., et Garcia Del More, L. F. (1994) Yield and quality of spring triticale used for forage and grain as influenced by sowing date and cutting stage. *Field Crops Research* **37**, 161-168.
- Rys, G. J., Smith, N., et Slay, M. W. (1988) Alternative forage species for Hawkes bay. In. "Proceedings annual conference agronomy society of New Zealand" **18**, 75-80.

Bibliographie

- Saeed, M. et Francis, C. A. (1984) Association of weather variables with genotype x environment interactions in grain *Sorghum*. *Crop Science* **24**, 13-16.
- Sanaa, M. (1993) Dynamique et bilan de l'azote minéral dans quelques sols calcaires en Tunisie. *Thèse de Doctorat. Université de Gent, Belgique* 175p.
- Sanford, J. O. et Hairston, J. E. (1984) Effects of N Fertilization on yield, growth, and extraction of water by wheat following soybean and grain sorghum. *Agronomy Journal* **76**, 623-627.
- Sarno, R., Stringi, L., et D'Alessandro, F. (1978) The relationship between the morphological behavior and productivity and the altitude of provenance of some sulla (*Hedysarum coronarium* L.) populations. *Quaderni di agronomica* **9**, 141-167.
- SAS Institute, Inc. (1985) SAS user's guide: statistics, SAS Institute, Inc., Cary, NC.
- Satta, A., Acciaro, M., Floris, I., Lentini, A., et Sulas, L. (2001) Insect pollination of sulla (*Hedysarum coronarium* L.) and its effect on seed production in a mediterranean environment. *Options méditerranéennes*. CIHEAM.
- Sauerbeck, D. R. et Johnen, B. G. (1977) Root formation and decomposition during plant growth. In "Soil organic matter studies". 1. vol. International atomic energy agency, Vienna, 141-147.
- Schulz, H., Bodker, L., Nistrup Jorgensen, L., et Christensen, K. (1990) Influence of different cultural practices on distribution and incidence of eyespot in winter rye and winter wheat. *Tidsskr Planteavl.* **94**, 211-221.
- Sebillote, M. 1990. Système de culture, un concept opératoire pour les agronomes. In. "Un point sur les systèmes de culture". INRA. France, 190-195.
- Semadeni, A. (1976) Le sulla en Tunisie, (741).
- Shaffer, J. A., Fritton, D. D., Jung, G. A., et Stout, W. L. (1990) Control of soil physical properties and response of *Brassica rapa* L. Seedling roots. *Plant and Soil* **122**, 9-19.
- Shiva, V. (1994) La production agricole et alimentaire. *Cahiers d'éducation environnementale*. Centre UNESCO de Catalunya.
- Simon, J. C. (1985) Evolution de l'indice foliaire d'un peuplement de ray-grass d'Italie (*Lolium multiflorum* Lam.) en phase d'implantation. *Agronomie* **5**, 645-651.
- Singh Shree, P. (1995) Selection for water stress tolerance in Common Bean. *Crop Science* **35**, 118-124.
- Slim, S. (2004) Amélioration fourragère et protection des terres par le sulla Bikra 21 dans les gouvernorats de Zaghuan et Siliana. *Mémoire de Master INA Tunisie*, 130p.
- Smaoui, A. et Cherif, A. (1986) Effet de la salinité sur la germination des graines de cotonnier. In. "Colloque sur les végétaux en milieux arides". Jerba 8-10 Septembre 1986. Faculté des Sciences de Tunis. ACCT. 578-585.
- Sneath P. H. A. et Sokal, R. R. (1973) "The principle and practice of numerical classification: numerical taxonomy". (D. Kennedy, et R. B. Park, eds.), Freeman San Francisco.

Bibliographie

- Sneller, C. H., Kilgore-Norquest, L., et Dombek, D. (1997) Repeatability of yield stability statistics in soy bean. *Crop Science* **37**, 383-390.
- Sonet, M. et Jacob-Renacle, A. (1987) Pollinisation de la légumineuse fourragère *Hedysarum coronarium* L. en Tunisie. *Bulletin des recherches agronomiques de Gembloux* **22**, 19-32.
- Squartini, A., Struffi, P., Do ring, H., Seleska-Pobell, S., Tola, E., Giacomini, A., Vendramin, E., Velazquez, E., Mateos, P. F., Martinez-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**, 1267-1276.
- Srivstava, J. P. (1986) Problem of seed production in forage crops. *Seed production and technology*. USA-ICARDA., 287p.
- Steed, G. R., Ellington, A., et Pratley, J. E. (1993) Conservation tillage in the south-eastern Australian wheat-sheep belt. In. "Conservation tillage in temperate agro-ecosystems-development and adaptation to soil and climatic constraints". (M. R. Carter, ed.), 231-250.
- Stewart, J. W. B. et Bettany, J. R. (1982) Dynamics of soil organic phosphorus and sulfur. p. 61. In. "Trans. Int. Congr. Soil Sci., 12th". New Delhi, India. 8-16 Feb. 1982. Vol. 6. Indian Soc. Soil Sci., Div. of Soil Sci. and Agric. Chem., c/o Indian Agric. res. Inst. New Delhi.
- Stoa, T. E. et Zubriski, J. C. (1969) Crop rotation, crop management and soil fertility studies on Fargo clay. N. D. Agric. Exp. Stn. res. rep. 20.
- Stringi, L., Amata, G., Leto, G., Alicata, M. L., Gristina, L., et Di Prima, G. (1991) Yield, chemical composition and nutritive value of sulla (*Hedysarum coronarium* L.) under grazing in a semi-arid environment. *Rivista di Agronomia* **25**, 184-194.
- Stute, J. K. et Posner, J. L. (1993) Legume cover crop options for grain rotation in Wisconsin. *Agronomy Journal* **85**, 1128-1132.
- Stuthman, D. D. et Marten, G. C. (1972) Genetic variation in yield and quality of oat forage. *Crop science* **12**, 831-833.
- Sulas, L. G. A. R. et Caredda, S. (1996) Hard seed breakdown pattern of sulla (*Hedysarum coronarium* L.) in relation to its regeneration capacity and persistence. Centro di Studio sui Pascoli Mediterranei et Istituto di Agronomia Generale e Coltivazioni Erbacee. Sassari, Italie.
- Szabolcs, I. (1994) Soils and salinization. In. "Handbook of plant and crop stress". (M. Pessarakli, ed.) 1-12. Marcel Dekker, New York.
- Taylor, G. B. (1996) Effect of the environment in which seeds are grown and softened on the incidence of autumn seed softening in two species of annual medics. *Australian journal of agricultural research* **47**, 141-159.
- Taylor, G. B. et Ewing, M. A. (1988) Effect of depth of burial on the longevity of hard seeds of subterranean clover and annual medics. *Australian Journal of Experimental. Agriculture* **28**, 77-81.
- Thiault, M. (1957) Les pelouses de la Tunisie du nord et leurs aptitudes pastorales. *Annales du Service Botanique et Agronomique de Tunisie* **30**, 165-170.

- Tibaoui G. 1986. Amélioration de la production des légumineuses fourragères par l'inoculation et la fertilisation. *Mémoire de fin d'études du cycle de spécialisation de l'INA Tunisie*, 156p.
- Timothy, D. H. (1972) Plant germplasm resources and utilization. In. "The care less technology: ecology and international development". (M. T. Farvar., and J. P. Milton, eds.), the natural history Press, New York.
- Timothy, D. H. et Goodman, M. M. (1979) Germplasm preservation: the basic of future feast or famine; genetic resources of maize. an example. In. "The plant seed: Development, preservation and germination". (I. Rubenstein, R. L. Phillips, C. E. Green, and B. G. Gengebach, eds.), Academic Press, New York, 171-200.
- Townley-Smith, L., Slinkard, A. E., Bailey, L. D., Biederbeck, V. O., et Rice, W. A. (1993) Productivity, water use and nitrogen fixation of annual-legume green manure crops in the dark brown soil zone of Saskatchewan. *Canadian Journal of Plant Science* **73**, 139-148.
- Tracy, P. W. (1986) Soil future dynamics in dry land winter wheat-summer fallow management systems. Ph. D. diss. Colorado State Univ., Fort Collins (Diss. Abstr. 87-05489).
- Trifi-Farah, N., Chatti, W. S., Marrakchi, M., et Pernest, J. (1989) Analyse de la variabilité morphologique et enzymatique des formes cultivées et spontanées de *Hedysarum coronarium* L. en Tunisie. *Agronomie* **9**, 591-598.
- Tyler, B. F. et Charlton, K. H. (1976) Ecotypic differentiation in *Lolium perenne* populations. *Report of the welsh plant breeding station* **1975**, 14-15.
- Umberto Quattrocchi, F. L. S. (2000) "CRC World dictionary of plant names: common names, scientific names, eponyms, synonyms and etymology". (CRC press LLC, ed.). Vol. IV, R-Z.
- Unger, P. W. (1994) Tillage effects on dry land wheat and *Sorghum* production in the southern great plains. *Agronomy Journal* **86**, 310-314.
- Vanotti, M. B. et Bundy, L. G. (1995) Soybean effects on soil nitrogen availability in crop rotation. *Agronomy Journal* **87**, 676-680.
- Varvel, G. E. et Peterson, T. A. (1992) Nitrogen fertilizer recovery by soybean in monoculture and rotation systems. *Agronomy Journal* **84**, 215-218.
- Varvel, G. E. (1994) Rotation and nitrogen fertilization effects on changes in soil carbon and nitrogen. *Agronomy Journal* **86**, 319-325.
- Vasquez-Yanes, C. et Orozco-Sagovia, A. (1993) Patterns of seed longevity of germination in the tropical rain forest. *Review of Ecology and Systematics* **24**, 69-87.
- Vavilov, N. I. (1926) Studies on the origin if cultivated plants. *Bulletin of applied botany genetics and plant breeding* **16**, 248p.
- Viaux, P., Bodet, J. M., et Le Gall, A. (1999) Complémentarité herbe-cultures dans les rotations. *Fourrages* **160**, 345-358.
- Vilain, M. (1989) Les systèmes de production et les systèmes de cultures. In. "La production végétale" **2**. La maîtrise technique de la production, 299-322.

Bibliographie

- Villax, E. J. (1963) "La culture des plantes fourragères dans la région méditerranéenne occidentale". In. Les cahiers de la recherche agronomique. (INRA Rabat, Maroc, ed.), (17), 641p.
- Vincent, J. H. (1974) "Root nodule symbiosis with rhizobium in the biology of nitrogen fixation". (A. Quispel, ed.), Nederland, Amsterdam, 265-341.
- Wagger, M. G. (1989) Time of desiccation effects on plant composition and subsequent nitrogen release from several winter annual cover crops. *Agronomy Journal* **81**, 236-241.
- Waisel, Y. (1972) Biology of halophytes. Academic press, New York and London, 375p.
- Walter, R. F. (1987) "Principles of cultivar development: Theory and technique". (Mac Millan publishing company, eds.), New York, 124-380.
- Walton, P. D. (1971) The genetics of yield in spring wheat. *Can. Journal of Genetics and Cytology* **13**, 110-114.
- Wani, S. P., Rupela, O. P., et Lee, K. K. (1995) Sustainable agriculture in the semi-arid tropics through biological nitrogen fixation in grain legumes. *Plant and Soil* **174**, 29-49.
- WCMC. 1992. Global diversity: Status of the earth's living resources. Chapman and Hall, London.
- West, C. P., McConnel, M., Saidi, S., Ben Jeddi, F., et Charmet, G. (1992) Collection of endophyte infected Festuca germplasm in western mediterranean countries. *Agronomy Abstracts* **501**, 575-3982.
- Wassermann, R. L., Boman, R. K., Raun, W. R., et Johnson, G. V. (1994) Ammonium and nitrate nitrogen in soil of long term winter wheat fertilization experiments. *Agronomy Journal*. **86**. 94-99.
- White, L. M. (1979) Relationship between meteorological measurements and flowering of index species to flowering of 53 plants species. *Agriculture Meteorology* **20** 189-204.
- Wilkes, H. G. (1985) Teosinte. the closest relative of maize. *Maydica* **30**, 209-223.
- Wiricke, G. (1962) Estimates of genotypic value: A proposed method. *Euphytica* **22**, 121-123.
- Yankovitch, M. L. (1946) Du régime de la fertilité d'une terre en climat semi-aride et de son incidence sur la fumure du blé en Afrique du nord. *Annales du Service Botanique et agronomique de Tunisie* **19**, 3-32.
- Yankovitch, M. L. (1955) Humus du sol et engrais organiques en régions semi-arides. In. "Académie d'agriculture de France". Extrait du PV. de la séance N°: 4.010 du 30 Novembre 1955. (Maison Poulet, ed.). Malassis, Alençon (Orne).
- Zhang, M., Liy, Y., Torii, I., Sasaki, H., et Esashi, Y. (1993) Evolution of volatile compounds by seeds during storage periods. *Seed Science and Technology* **21**, 359-373.
- Zhang, H. Y., Umezawa, Y., Nakagawa, Y., et Essahi, Y. (1995) GC-MS Identification of volatile compounds evolved by dry seeds in relation to storage conditions. *Seed Science and Technology* **23**, 59-68.

Bibliographie

- Zouaghi, M. (1987) Production fourragère et pastorale en Tunisie : identification des problèmes et besoins de recherche à long terme. *In*. "Programme de développement de recherche agricole en Tunisie". 194-227. ISNAR. R 27 F.
- Zouaghi, M. (1988) L'énergie et l'agriculture. *In*. "Commission nationale de l'énergie". Tunis 9 Novembre 1988.
- Zouaghi, M. et Ben Jeddi, F. (1988) Index Seminum. INA. Tunisie, 6p.
- Zouaghi, M. (1989) Le patrimoine génétique fourrager et pastoral: ressources à préserver et à promouvoir. *In*. "Actes ACCT". Réseau TRAM. Rabat, Décembre 1989. 107-115.
- Zouaghi, M. (1991) L'énergie en agriculture: essai d'analyse prospective. *In* "5^{ème} journées de biologie de la société tunisienne des sciences naturelles". Sousse, Novembre 1991.
- Zouaghi, M. (1998) Biodiversité fourragère et pastorale. *In*. "Etude nationale de la diversité biologique de la Tunisie. Monographie". (La page infographique, ed.). Ministère de l'Environnement et de l'Aménagement du territoire, Tunisie.
- Zouaghi, M. (2001) Rôle du sulla du nord (*Hedysarum coronarium* L.) dans les systèmes de culture selon les principes de base d'une agriculture durable. Journée d'étude sur les nouveautés dans la recherche: l'amélioration du sulla local comme source durable pour l'alimentation animale. INAT-CCSPS. M'jez El Bab. Tunisie. 5 Avril 2001.

ANNEXES

1. PRESENTATION DES PARAMETRES DE CARACTERISATION DES POPULATIONS SPONTANEEES DU SULLA DU NORD LOCAL

Tableau I a Paramètres de caractérisation des populations spontanées du sulla du nord
 SFH, SFP: surfaces foliaires hivernale et printanière; MSH, MSP: matières sèches hivernale et printanière; TSP: taux de la matière sèche printanier; SFF: surface foliaire au stade florale; HVH, HVP: hauteur de la végétation hivernale et printanière; TSH: taux de la matière sèche en hiver; Si: populations de sulla

Si	SFH	SFP	SFF	HVH	HVP	TSH	TSP	BSH	BSP
	cm ² /plante			cm		%		g/m	
S1	42,4	838,1	1661,0	46,0	123,7	10,8	25,7	86,0	1900,8
S2	37,9	303,1	1104,5	43,3	94,3	11,6	25,0	119,5	1796,4
S3	52,0	1348,6	2610,4	51,0	153,3	11,5	15,8	274,0	1181,1
S4	80,5	723,3	2771,8	53,0	111,7	11,5	16,0	204,3	1124,0
S5	81,1	1015,0	1143,9	30,3	37,3	10,67	16,5	120,6	1326,8
S6	105,4	521,6	3436,1	29,3	67,0	10,7	17,2	194,9	1328,7
S7	24,4	563,3	651,6	41,3	76,7	12,2	18,4	122,8	1129,3
S8	33,1	415,1	959,6	43,3	33,7	12,0	18,0	165,8	1133,9
S9	20,5	451,8	1929,3	10,3	32,7	13,3	16,8	43,2	1083,5
S10	28,4	205,8	1826,4	13,0	29,3	13,3	16,0	62,5	1036,0
S11	32,6	371,2	2193,7	14,0	23,7	11,0	16,3	18,3	745,9
S12	32,2	359,9	3488,4	15,3	16,3	11,5	16,0	73,4	640,9
S13	32,4	366,0	3412,1	29,7	63,3	10,5	18,5	182,5	1206,9
S14	25,4	281,7	2152,8	33,7	108,3	10,0	18,0	185,4	1049,5
S15	42,3	819,9	2371,1	20,7	48,7	10,0	15,5	35,1	521,4
S16	50,6	221,7	2520,4	21,3	66,7	14,3	15,0	101,1	505,8
S17	16,2	292,7	1621,7	17,7	46,0	14,5	13,3	45,2	446,2
S18	20,6	204,1	1623,1	17,3	47,3	11,7	13,0	58,5	424,9
S19	43,6	740,4	2248,8	24,3	32,7	11,4	16,5	85,8	1022,2
S20	58,5	429,9	1037,8	25,0	73,3	10,0	16,5	191,8	1021,6
S21	32,6	605,5	961,4	23,7	95,0	10,0	15,5	152,7	563,7
S22	30,8	238,3	736,7	21,7	43,7	12,2	15,0	113,9	527,0
S23	30,0	161,71	820,7	24,3	25,7	12,2	14,3	100,3	350,4
S24	33,3	207,3	652,4	24,3	24,0	11,3	14,0	148,1	280,0
S25	27,9	734,4	773,9	12,7	61,7	11,0	14,4	80,2	713,7
S26	26,6	550,9	1460,6	14,0	36,7	12,5	14,0	63,6	619,8
S27	22,7	201,3	1258,4	10,3	58,0	12,6	16,2	35,2	910,9

Tableau I b Paramètres de caractérisation des populations spontanées du sulla du nord

FTF: rapport feuilles sur tiges au stade floral; LIF: longueurs de l'inflorescence au stade floral; NFI: nombre de fleurs par inflorescence; DTP: diamètre de la tige principale au stade floral; TRF: total des rameaux au stade floral; LRF: longueur des rameaux au stade floral; TFM: rapport longueur sur largeur de la feuille médiane; l des rameaux au stade floral; LFM: longueur de la feuille médiane; FTH: rapport feuilles sur tiges en Hiver; Si: populations de sulla

Si	TRF	LRF cm	TFM	LFM cm	NFI	LIF _____cm_____	DTP	FTH	FTP
S1	6,3	38,0	1,5	57,2	86,7	30,42	1,9	1,4	0,8
S2	1,3	0,0	1,4	61,4	72,3	35,4	1,7	1,4	0,8
S3	5,0	70,0	1,9	64,9	79,7	27,0	1,6	0,9	0,5
S4	7,0	68,0	1,7	45,9	91,7	22,2	1,5	0,9	0,6
S5	1,7	0,0	1,6	48,9	70,3	18,2	1,3	1,4	1,4
S6	5,7	125,0	1,9	52,5	72,0	18,2	1,2	1,8	1,4
S7	4,0	21,0	1,6	72,1	46,3	23,2	0,9	1,7	0,7
S8	2,7	74,0	1,5	48,8	30,3	37,2	0,6	1,9	0,7
S9	11,7	94,0	1,7	55,1	33,3	16,1	0,6	1,9	0,4
S10	8,7	82,0	1,5	54,0	45,3	18,2	0,5	2,3	0,4
S11	23,3	98,0	1,3	55,3	64,7	14,3	0,6	2,3	0,6
S12	15,7	100,0	1,4	33,4	53,0	14,3	0,5	1,4	0,6
S13	8,3	108,0	1,8	32,7	50,0	14,1	0,9	1,4	0,3
S14	18,7	129,0	1,7	47,1	42,0	17,7	0,7	2,2	0,3
S15	21,0	103,0	1,8	54,7	42,7	22,9	0,9	2,1	0,4
S16	17,0	101,0	1,9	30,9	52,3	15,1	0,8	2,4	0,4
S17	14,7	100,0	1,7	47,0	57,0	15,1	0,6	2,4	0,4
S18	8,7	100,0	1,8	48,5	70,3	16,5	0,8	1,3	0,4
S19	20,3	110,00	2,1	55,0	38,3	18,0	0,6	1,3	0,3
S20	10,0	82,0	2,0	54,1	49,7	12,3	0,9	1,8	0,3
S21	9,0	112,0	1,7	48,9	42,0	19,0	0,8	1,8	0,4
S22	5,7	93,0	1,3	50,3	45,0	13,4	0,6	2,1	0,4
S23	7,0	72,0	1,8	52,2	53,0	13,7	0,4	2,1	1,1
S24	1,3	0,0	1,5	55,2	63,0	14,5	0,6	2,2	1,1
S25	13,3	73,0	1,59	54,1	54,7	15,2	0,6	2,2	0,6
S26	13,0	74,0	1,6	44,3	58,0	14,0	0,5	1,8	0,6
S27	24,3	117,0	1,5	38,0	61,7	20,8	0,8	1,8	0,5

Tableau I c Paramètres de caractérisation des populations spontanées du sulla du nord

PMG: poids de mille graines; TGD: taux de graines dures; SFC: surface foliaires cotylédonaire; TCP: rapport longueur sur largeur des cotylédons; SFU: surface foliaire de la première feuille unifoliée; LTH: longueur de la tige principale en hiver; LTP: longueur de la tige principale au printemps; SFI: : surfaces foliaires respectives à l'installation; TRT: taux de ramification tertiaire

Si	PMG g	TGD %	SFC cm ²	TCP	SFU cm ²	TRT	SFI cm ² /plante	LTH _____cm_____	LTP
S1	4,9	3,7	1,0	1,2	8,9	0,0	9,3	0,0	1,0
S2	4,9	4,0	1,0	1,1	8,9	6,7	10,8	0,0	0,0
S3	5,8	59,0	1,4	1,0	12,0	0,0	21,8	15,0	28,3
S4	6,8	58,7	1,6	0,9	12,0	0,0	22,0	9,0	16,3
S5	5,2	58,0	1,2	1,3	15,3	50,0	22,6	4,3	19,3
S6	5,1	59,0	1,2	1,3	15,2	46,7	22,8	3,0	7,3
S7	4,8	61,3	0,8	1,4	10,7	0,0	7,6	0,0	0,0
S8	4,8	60,0	0,7	1,4	10,7	0,0	7,4	0,0	3,0
S9	3,8	91,0	0,6	1,2	8,2	46,0	8,3	1,0	0,0
S10	3,8	92,0	0,7	1,2	8,5	43,0	8,8	1,0	1,0
S11	4,3	68,0	0,6	1,2	9,3	64,3	4,4	0,0	0,0
S12	4,3	68,3	0,6	1,2	9,3	64,3	4,5	0,0	0,0
S13	3,9	96,3	0,6	1,2	5,6	52,3	11,8	4,0	5,7
S14	3,9	94,3	0,6	1,2	5,2	54,3	11,8	4,0	6,3
S15	4,3	85,3	0,7	1,2	4,7	53,3	9,2	2,0	2,0
S16	4,3	83,7	0,8	1,1	4,7	56,3	9,8	2,0	2,3
S17	4,2	89,3	0,8	1,2	7,6	39,7	11,4	1,0	1,0
S18	4,2	90,0	0,9	1,2	7,9	43,3	11,6	1,0	1,0
S19	4,2	87,3	0,7	1,3	7,2	60,3	13,7	0,0	0,0
S20	4,2	90,3	0,8	1,3	7,5	60,3	13,5	0,0	0,0
S21	5,0	89,3	0,8	1,2	8,7	29,3	6,6	1,0	2,0
S22	5,0	88,3	0,8	1,2	8,7	31,3	6,8	3,0	3,3
S23	3,6	87,7	0,7	1,3	9,9	33,7	10,4	0,0	0,0
S24	3,6	87,0	0,7	1,3	9,8	32,3	10,6	1,0	1,0
S25	4,9	34,3	0,7	1,1	9,1	42,3	5,9	0,0	0,0
S26	4,8	34,3	0,8	1,1	8,9	40,7	6,0	1,0	1,0
S27	3,9	87,0	0,8	1,0	9,6	52,6	7,1	1,0	1,0

Tableau I d Paramètres de caractérisation des populations spontanées du sulla du nord

LTF: longueurs de la tige au stade floral; TEF: longueur sur largeur de l'étendard, TAF: longueur sur largeur de l'aile; TCF: longueur sur largeur de la carène; LEF: longueur des étamines; G05: germination à 05°C; G35: germination à 35°C; TMG: température à maximum de germination

Si	LTF cm	TEF	TAF	TCF	LEF mm	G05 %	TMG °C	G35 %
S1	121,7	2,7	4,3	2,0	20,7	96,0	5,0	71,3
S2	93,3	2,6	4,3	2,0	21,3	96,0	20,0	71,0
S3	156,7	2,5	4,6	2,0	15,0	58,0	5,0	18,0
S4	111,7	2,5	4,6	2,1	14,7	58,0	10,0	16,7
S5	41,7	2,7	5,7	2,0	20,3	47,3	10,0	25,3
S6	67,0	2,8	5,7	2,0	20,0	48,0	15,0	23,7
S7	85,0	2,3	3,8	2,0	15,0	41,3	10,0	44,0
S8	34,3	2,3	3,7	2,1	15,0	40,3	20,0	43,0
S9	32,7	2,7	5,3	2,0	18,3	41,3	10,0	22,7
S10	31,7	2,7	5,3	1,9	18,3	42,7	20,0	20,3
S11	21,7	2,9	5,3	1,9	18,0	41,3	15,0	32,0
S12	11,0	2,9	5,3	1,9	18,3	36,7	25,0	30,7
S13	66,3	2,8	4,7	2,1	18,0	42,7	5,0	15,3
S14	105,7	2,8	4,6	2,1	18,0	45,7	25,0	16,7
S15	50,3	2,8	5,0	1,5	17,0	33,3	10,0	20,7
S16	64,7	2,8	5,0	1,6	17,0	34,3	5,0	18,7
S17	45,0	2,4	4,5	2,1	18,3	49,3	5,0	34,0
S18	45,0	2,4	4,5	2,1	18,3	49,3	25,0	35,3
S19	29,6	2,8	4,3	2,0	14,7	59,3	20,0	52,7
S20	71,0	2,8	4,3	1,9	15,0	55,3	25,0	51,0
S21	95,3	2,8	5,3	2,0	18,7	48,7	15,0	35,3
S22	44,3	2,8	5,4	2,0	18,3	50,3	25,0	35,7
S23	25,7	2,6	4,6	2,1	18,0	26,0	10,0	34,0
S24	24,0	2,7	4,7	2,1	18,0	28,3	20,0	34,7
S25	61,0	2,5	3,7	2,14	17,7	46,7	15,0	19,3
S26	35,7	2,5	3,7	2,1	17,7	46,7	20,0	12,0
S27	50,0	2,7	4,7	2,1	18,3	33,3	15,0	0,0

2. PRESENTATION DES DONNEES DE SELECTION DES FAMILLES DE LA GENERATION ASCENDANTE A G4

- La sélection au niveau des générations de sulla de départ à savoir, F0, F1, F2 et F3, est réalisée sur la base des observations et évaluation des paramètres agronomiques sur pied c'est à dire, sans couper les plantes. Les plantes indésirables ont été éliminées avant d'atteindre le stade floraison afin d'éviter tout croisement inutile. Cette technique est adoptée pour ne pas sacrifier des plantes qui pourraient être retenues plus tard comme géniteurs. Ces individus sont ainsi gardés pour la production de semences et assurer la génération suivante.

- Les paramètres de production fourragère et de qualité comme les protéines, les taux de matière sèche, la digestibilité, les unité fourragères, le rapport feuilles sur tiges etc., qui nécessitent des coupes particulières ne sont évalués qu'au cours de la **génération F4 formée seulement par 17 génotypes** d'une parfaite homogénéité interne.

- Lors de la sélection qui aboutit à la fixation de 17 génotypes, une classification de toutes les familles ascendantes par ordre croissant a été réalisée. Cette classification est faites selon des critères et observations au cours du cycle de développement des plantes sans être coupées.

La classe 1 est toujours attribuée au meilleur génotype recherché. Cette classe ne correspond pas toujours à la plus haute valeur donnée lors de l'évaluation. A titre d'exemple, au plus faible diamètre des tiges (DT) correspond la classe 1. Alors que pour d'autres paramètres où on cherche les génotypes ayant la croissance la plus rapide comme la hauteur de végétation (HV), la classe 1 est donnée à la valeur la plus élevée. Le degré de sensibilité des sullas à l'oïdium (OID) a été déterminé par des notations préliminaires allant de 1 à 10 selon le degré d'infestation des feuilles. Ainsi, les plantes qui ne développent pas du tout des taches oïdiens, soit 0 % de la surface foliaire est infectée, auront comme classe 1.

Vu que les plantes à ce niveau de sélection ne peuvent être coupées, des notations estimatives des biomasses (BM) qui nous donnent une idée sur le niveau de production future de la famille ont été réalisées sur le terrain d'une manière subjective. Ces notations varient de la plus forte biomasse à la plus faible donc de 1 à 10. La densité de végétation (DVF) représente le taux de couverture des plantes au stade floral et il varie des génotypes qui gardent des taux de couverture du sol au moins égale à 80 % aux génotypes qui enregistrent une disparition progressive des plantes au cours de leur cycle développement, ces derniers ont souvent des densités de végétation assez faibles.

En général, l'établissement des intervalles paramétriques est réalisé sur la base des limites minimales et maximales de chaque critère ou paramètre obtenu par l'ensemble des familles.

Le tableau II montre les limites de sélection et de classification des génotypes selon des intervalles paramétriques attribués.

Tableau II Limites de sélection et classification des géotypes par critère de sélection au sein de la génération ascendante à F4
 HVH et HVP: hauteurs de végétation respectivement en hiver et au printemps; SFP: surface foliaire printanière, BMH et BMP: biomasses en hiver et au printemps; NRT: nombre total de rameaux; DT: diamètre des tiges; OID: sensibilité à l'oïdium; NFT: nombre de feuilles vertes restantes au stade floraison; DVF: densité de végétation au stade floraison

Classement	HVH ____cm____	HVP cm/plante	SFP cm ² /plante	BMH	BMP	NRT	DT cm	OID	NFT	DVF
1	>20	>100	>2250	1	1	>18	<0,3	<10%	>17	1 (>80%)
2	20-18	100-90	2250-2000	2	2	18 16	0,3-0,5	10%	17-16	2 (80-70)
3	18-16	90-80	2000-1750	3	3	16-14	0,5-0,7	20%	15-14	3 (70-60)
4	16 14	80-70	1750-1500	4	4	14-12	0,7-0,9	30%	13-12	4 (60-50)
5	14-12	70-60	1500-1250	5	5	12-10	0,9-1,1	40%	11-10	5 (50-40)
6	12-10	60-50	1250-1000	6	6	10-8	1,1-1,3	50%	9-8	6 (40-30)
7	10-8	50-40	1000-750	7	7	8-6	1,3-1,5	60%	7-6	7 (30-20)
8	8-6	40-30	750-500	8	8	6-4	1,5-1,8	70%	5-4	8 (20-10)
9	6-4	30-20	500-250	9	9	4-2	1,8-2,1	80%	3-2	9 (<=10)
10	<= 4	<=20	<250	10	10	<=2	>=2,1	>90%	<=1	10

En effet, ces limites ont été établies selon des règles agronomiques et fourragères bien déterminées. A titre d'exemple, le niveau plus de 20 cm fixé pour le critère HVH détermine le niveau idéal du fourrage pour qu'il soit pâturé ou bien fauché précocement en hiver (janvier). En cette période de déficit fourrager, les sillas qui atteignent rapidement cette hauteur sont les plus demandés. La fixation de ces limites se base aussi sur la variabilité observée lors des notations des familles qui se trouvent toujours confrontées au témoin Sgaravatti (tableaux III a et b; IV a et b). La classification ultérieure des familles a été faite sur la base du total de points rassemblés. Ainsi, le géotype qui rassemble le plus faible total est classé le premier. Si deux familles se classent au même niveau, le recours au détail des paramètres de classement devient obligatoire (cas de S4L3 et S12L1 ou d'autres).

Seulement 17 géotypes ont été retenus pour l'évaluation. Au delà de ce seuil, la situation des sillas devient mauvaise; soit avec de très faibles croissances hivernales, une sensibilité à l'oïdium assez importante, grosse tige etc.. Cette situation engendre souvent un fourrage de mauvaise qualité. Ces géotypes retenus forment un ensemble de familles à port différent allant du strictement orthotrope comme les S1L1, S1L6 et S1L10 aux types plagiotropes ou même strictement plagiotrope comme S10L4. Cette diversité sera très utile dans la détermination de la vocation fourragère du silla sélectionné qui varie selon le système fourrager adopté.

Tableau III a Sélection et évaluation des 17 génotypes de sulla (F4) à l'intérieur des 50 familles

HVH et HVP: hauteurs de la végétation hivernale et printanière; SFP: surface foliaire printanière; BMH et BMP: biomasses fourragères hivernale et printanière; port: architecture des plantes; NRT: nombre de rameaux par plante; DT: diamètre des tiges; OID: symptôme oïdien sur le feuillage; NFT: nombre de feuilles par tige; DVF: densité de la végétation en floraison; Gi: génotypes de sulla

Gi	HVH	HVP	SFP	BMH	BMP	port	NRT	DT	OID	NFT	DVF
S1L5	11	89	806,5	4	1	O	6	2	9	7	8
S1L9	8	91	763,9	3	2	O	5	2,1	9	7	1
S1L10	20	91	1004,7	1	1	SO	6	0,7	1	12	1
S1L3	5	80	874,6	6	7	O	4	1,2	8	8	2
S1L7	12	86	624,8	7	8	O	3	1,5	6	7	1
S1L4	4	42	756,3	5	5	O	5	1,0	6	12	1
S1L1	15	74	408,0	5	7	SO	5	1,1	1	8	4
S1L6	15	85	805,7	3	2	SO	3	0,9	1	10	5
S2L1	13	49	655,2	4	3	P	4	0,5	2	12	3
S2L2	11	41	875,6	6	2	M	1	1,1	7	10	6
S2L4	8	57	884,8	8	8	M	4	0,9	6	10	6
S2L5	3	41	844,5	9	5	M	1	1,3	7	9	7
S12L1	7	75	943,1	5	5	M	17	0,9	9	10	6
S19L1	7	57	913,3	5	6	O	4	1,0	7	10	6
S16L1	4	84	1332,8	7	7	M	12	1,4	7	8	7
S20L1	7	100	2543,8	7	9	M	10	0,5	5	10	8
S21L1	5	92	1763,58	4	8	O	5	1,5	1	11	8
S4L10	17	72	1288,7	3	6	M	3	0,7	2	9	6
S4L3	7	88	1784,47	3	4	M	3	0,9	2	7	6
S4L4	11	64	783,1	4	4	M	5	0,8	1	16	4
S4L5	16	86	1315,5	4	8	M	3	0,9	1	10	6
S4L1	8	64	1192,8	6	2	M	2	1,1	8	8	6
S6L7	11	67	737,2	6	1	O	4	1,8	6	7	4
S6L9	16	52	654,0	7	7	O	5	1,5	6	7	2
S6L2	17	75	1281,9	1	2	O	15	0,7	2	9	2
S10L10	13	82	1100,6	8	5	O	6	0,8	9	6	5
S10L8	20	98	765,4	7	6	O	3	1,5	7	9	4
S10L6	12	84	1434,6	5	6	M	7	1,6	7	10	8
S7L1	6	67	1582,2	3	6	M	4	1,3	5	10	5
S7L4	4	96	2113,7	3	4	O	9	1,5	1	9	7
S7L9	2	87	235,8	4	8	M	12	0,6	1	9	8

Tableau III b Sélection et évaluation des 17 génotypes de sulla à l'intérieur des 50 familles

HVH et HVP: hauteurs de la végétation hivernale et printanière; SFP: surface foliaire printanière; BMH et BMP: biomasses fourragères hivernale et printanière; port: architecture des plantes; NRT: nombre de rameaux par plante; DT: diamètre des tiges; OID: symptôme oidien sur le feuillage; NFT: nombre de feuilles par tige; DVF: densité de la végétation en floraison

Gi	HVH	HVP	SFP	BMH	BMP	port	NRT	DT	OID	NFT	DVF
S8L2	6	71	1648,4	3	8	M	3	0,8	1	9	9
S8L6	2	95	856,3	4	9	M	11	0,5	7	10	7
S8L1	5	85	356,8	3	8	M	13	0,8	10	8	9
S14L7	4	66	778,2	3	4	M	3	1,5	1	8	9
S14L6	7	72	4900,4	4	4	M	20	0,7	1	14	3
S5L5	3	35	3499,9	4	4	M	15	0,7	9	9	7
S9L1	2	62	4085,9	4	3	O	15	0,7	1	16	4
S7L6	2	18	5052,9	4	4	P	25	0,4	8	10	7
S7L5	2	25	535,4	7	8	SP	37	0,2	8	10	8
S7L7	25	158	4019,2	4	4	SO	17	0,9	6	18	8
S13L9	1	15	5170,8	7	3	SP	15	0,6	1	13	5
S13L2	13	128	1913,4	2	4	O	9	0,7	1	12	4
S10L5	11	26	202,0	10	10	P	2	0,5	1	11	2
S10L4	3	64	1102,2	2	2	SP	17	0,6	1	17	3
S9L2	4	26	1150,8	7	5	P	8	0,9	1	11	1
S9L12	16	65	1144,7	2	1	O	5	1,8	2	13	2
S9L11	16	60	712,3	6	8	O	7	1,2	8	14	2
S9L8	1	5	874,6	4	5	P	3	0,9	1	10	9
S3L7	4	84	1332,8	7	7	M	12	1,4	7	8	7
Témoin	17	90	669,9	7	8	O	3	1,7	8	11	2

Tableau IV a Classification des 17 géotypes de sulla à l'intérieur des 50 familles
 HVH et HVP: hauteurs de la végétation hivernale et printanière; SFP: surface foliaire printanière; BMH et BMP: biomasses fourragères hivernale et printanière; port: architecture des plantes; NRT: nombre de rameaux par plante; DT: diamètre des tiges; OID: symptôme oidien sur le feuillage; NFT: nombre de feuilles par tige; DVF: densité de la végétation en floraison

Gi	HVH	HVP	SFP	BH	BMP	port	NR	DT	OID	NF	DV	Total	Rang
S1L5	6	3	7	4	1	O	8	9	9	7	8	62	34
S1L9	8	2	7	3	2	O	8	10	9	7	1	57	22
S1L10	2	2	6	1	1	SO	8	4	1	4	1	30	1
S1L3	9	4	7	6	7	O	9	6	8	6	2	64	44
S1L7	6	3	8	7	8	O	9	8	6	7	1	63	38
S1L4	10	7	7	5	5	O	8	5	6	4	1	58	24
S1L1	4	4	9	5	7	SO	8	6	1	6	4	54	16
S1L6	4	3	7	3	2	SO	9	5	1	5	5	44	8
S2L1	5	7	8	4	3	P	9	3	2	4	3	48	12
S2L2	8	7	7	6	2	M	10	6	7	5	6	64	44
S2L4	8	6	7	8	8	M	9	5	6	5	6	68	50
S2L5	10	7	7	9	5	M	10	7	7	6	7	77	51
S12L1	8	4	7	5	5	M	2	5	9	5	6	56	18
S19L1	8	6	7	5	6	O	9	5	7	5	6	64	44
S16L1	10	3	5	7	7	M	5	7	7	5	7	62	34
S20L1	8	2	1	7	9	M	6	3	5	6	8	55	17
S21L1	5	2	2	4	8	O	8	8	1	7	8	53	15
S4L10	3	4	5	3	6	M	9	4	2	6	6	48	12
S4L3	8	3	3	3	4	M	9	5	8	7	6	56	18
S4L4	6	5	7	4	4	M	8	4	1	2	4	45	9
S4L5	4	3	5	4	8	M	9	5	1	5	6	50	14
S4L1	8	5	6	6	2	M	10	6	8	6	6	63	38
S6L7	9	5	7	6	1	O	9	9	6	7	4	63	38
S6L9	4	6	8	7	7	O	8	8	6	7	2	63	38
S6L2	3	4	5	1	2	O	3	4	2	6	2	32	2
S10L10	5	3	6	8	5	O	8	4	9	7	5	60	30
S10L8	2	2	7	7	6	O	9	8	7	6	4	58	24
S10L6	9	3	5	5	6	M	7	8	7	5	8	63	38
S7L1	9	5	4	3	6	M	9	7	5	5	5	58	24
S7L4	10	2	2	3	4	O	6	8	9	6	7	57	22
S7L9	10	3	10	4	8	M	5	3	10	6	8	63	38

Tableau IV b Classification des 17 géotypes de sulla à l'intérieur de 50 familles
 HVH et HVP: hauteurs de la végétation hivernale et printanière; SFP: surface foliaire printanière; BMH et BMP: biomasses fourragères hivernale et printanière; port: architecture des plantes; NRT: nombre de rameaux par plante; DT: diamètre des tiges; OID: symptôme oidien sur le feuillage; NFT: nombre de feuilles par tige; DVF: densité de la végétation en floraison

Gi	HVH	HVP	SFP	BH	BP	port	NR	DT	OID	NF	DV	Total	Rang
S8L2	9	4	4	3	8	M	9	4	1	6	9	60	30
S8L6	10	2	7	4	9	M	5	3	7	5	7	59	28
S8L1	5	3	9	3	8	M	4	4	10	6	9	61	32
S14L7	10	5	7	3	4	M	9	8	1	6	9	62	34
S14L6	8	4	1	4	4	M	1	4	1	3	3	33	4
S5L5	10	8	1	4	4	M	3	4	9	6	7	56	18
S9L1	10	5	1	4	3	O	3	4	1	2	4	37	7
S7L6	10	18	1	4	4	P	1	2	8	5	7	59	28
S7L5	10	9	8	7	8	SP	1	1	8	5	8	65	47
S7L7	1	1	1	4	4	SO	2	5	6	1	8	32	2
S13L9	10	10	1	7	3	P	3	3	1	4	5	47	10
S13L2	5	1	3	2	4	O	6	4	1	4	4	34	5
S10L5	6	9	10	10	10	P	10	3	1	5	2	66	49
S10L4	10	5	6	2	2	SP	2	3	1	2	3	36	6
S9L2	10	9	6	7	5	P	7	5	1	5	1	56	18
S9L12	4	5	6	2	1	O	5	9	9	4	2	47	10
S9L11	4	6	8	6	8	O	7	6	8	3	2	58	24
S9L8	10	10	7	4	5	P	9	5	1	5	9	65	47
S3L7	10	3	5	7	7	M	5	7	7	5	7	62	34
Témoin	3	3	8	7	8	O	9	8	8	5	2	61	32

Tableau V Principales corrélations (R) entre les variables analysées au seuil 5% dans les populations sauvages du sulla du nord

SFH	R	SFP	R	SFF	R	HVH	R	HVP	R	TSP	R
MSH	0,51	DTP	0,54	LRF	0,50	HVP	0,70	HVH	0,70	HVH	0,55
DTP	0,54	FTH	0,52			TSP	0,55	MSH	0,62	HVP	0,45
FTF	0,53	PMG	0,59			MSH	0,71	MSP	0,51	MSP	0,88
PMG	0,53	SFC	0,57			MSP	0,60	DTP	0,76	LIF	0,67
SFC	0,67	LTF	0,52			LIF	0,68	PMG	0,54	DTP	0,66
SFU	0,58					DTP	0,75			TGD	0,63
SFI	0,61					FTH	0,57				
LTP	0,56					PMG	0,60				
MSH	R	MSP	R	TFM	R	LFM	R	NFI	R	LIF	R
SFH	0,51	HVH	0,60	SFI	0,41	LRF	0,48	DTP	0,63	HVH	0,68
HVH	0,71	HVP	0,51			TRT	-0,50	TGD	-0,47	TSP	0,67
HVP	0,62	TSP	0,87					SFC	0,61	MSP	0,63
SFC	0,49	LIF	0,63							DTP	0,61
LTF	0,63	DTP	0,74							TGD	-0,58
TRF	-0,53	FTH	0,51							TEF	-0,44
LTH	0,52	TGD	0,59							TRT	-0,73
LTP	0,68	LTF	0,52								
DTP	R	FTH	R	FTF	R	PMG	R	TGD	R	SFC	R
SFH	0,54	SFP	-0,52	SFH	0,53	SFH	0,53	TSP	-0,6	SFH	0,67
SFC	0,71	HVH	-0,57	SFU	0,76	SFP	0,59	MSP	-0,59	SFP	0,57
LTF	0,76	MSP	-0,51	TRF	-0,50	HVH	0,60	NFI	-0,47	HVH	0,60
TRT	-0,56	DTP	-0,62	LRF	-0,55	HVP	0,54	LIF	-0,58	HVP	0,55
				PMG	-0,53	DTP	0,58	DTP	-0,61	NFI	0,61
				SFC	-0,57	FTH	-0,53	LRF	0,55	DTP	0,71
						SFC	0,74	TRT	0,53	FTH	-0,57
						SFU	0,49			PMG	0,74
						LTF	0,54			SFU	0,59
						TRT	0,54			SFI	0,57
										LTF	0,56
										LTH	0,53
SFU	R	SFI	R	LTF	R	TEF	R	TAFR		TRF	R
SFH	0,58	SFH	0,61	SFP	0,52	TAF	0,68	TEF	0,68	SFU	-0,53
FTF	0,76	SFC	0,57	HVH	0,72	TRT	0,64	TRT	0,43	LRF	0,67
PMG	0,49	LTH	0,49	HVP	0,99					TRT	0,66
SFC	0,59	LTP	0,63	MSH	0,63						
TRF	-0,53			MSP	0,52						
				DTP	0,76						
				PMG	0,54						
				SFC	0,56						
				TRT	-0,57						
LRF	R	LTH	R	LTP	R	TRTR					
TRF	0,67	MSH	0,52	SFH	0,56	HVH	-0,78				
TRT	0,53	SFI	0,49	MSH	0,68	HVP	-0,54				
SFF	0,49	LTP	0,79	SFI	0,63	LFM	-0,50				
LFM	-0,48			LTH	0,79	LIF	-0,73				
FTF	-0,55					DTP	-0,56				
TGD	0,55					TRF	0,66				
						PMG	-0,54				
						TGD	0,53				
						LTF	-0,57				
						TEF	0,65				

Tableau VI Analyse de la variance avec les carrés moyens pour la germination des 27 populations du sulla sauvage
 **: test hautement significatif au seuil 1%

Source de variation	ddl	Carré moyen
génotypes	26	26731,03**
températures	6	36893,43**
durée	6	34972,17**
génotypes x températures	156	935,43**
durée x génotypes	156	277,13**
durée x températures	36	1497,88**
durée x génotypes x températures	936	146,45**
C.V %		25,89

Tableau VII Analyse de la variance des rendements en matière sèche du sulla de première année dans les deux sites Tunis-INAT et Mateur
 **: test hautement significatif au seuil 1%

Source de variation	ddl	carré moyen
génotypes	6	25,65**
sites	1	205,93**
génotypes x sites	6	6,67**
C.V %		21,62

Tableau VIII Analyse de la variance des rendements en matière sèche du sulla de deuxième année dans les deux sites Tunis et Mateur
 **: test hautement significatif au seuil 1%

Source de variation	ddl	carré moyen
génotypes	6	13,78**
sites	1	207,26**
génotypes x sites	6	10,38**
C.V %		12,16

Tableau IX Analyse de la variance des rendements totaux de la matière sèche génotypique du sulla (première et deuxième année) dans les deux sites Tunis-INAT et Mateur
 **: test hautement significatif au seuil 1%

Source de variation	ddl	carré moyen
génotypes	6	16,70**
sites	1	821,06**
génotypes x sites	6	30,45**
C.V %	11,90	

Tableau X Analyse de la variance des rendements génotypiques en UFL/ha en première et deuxième année de culture du sulla dans les deux sites Tunis-INAT et Mateur
 **: test hautement significatif au seuil 1%; ns: test non significatif

Source de variation	ddl	carré moyen
génotypes	6	22259900,46**
sites	1	226261083,85**
années	1	92736042,85**
génotypes x sites	6	8712410,10**
génotypes x années	6	2683948,10**
sites x années	1	54315,43 ns
génotypes x sites x années	6	820824,18**
C.V %	6,36	

Tableau XI Analyse de la variance des rendements protéiques (t/ha) du sulla local amélioré en première et deuxième année de culture et en comparaison avec le témoin dans les sites de Tunis-INAT et Mateur
 **: test hautement significatif; *: test significatif; ns: test non significatif

Source de variation	ddl	carré moyen
génotypes	6	0,75**
sites	1	8,23**
années	1	6,46**
génotypes x sites	6	0,38*
génotypes x années	6	0,10 ns
sites x années	1	0,10 ns
génotypes x sites x années	6	0,07 ns
C.V %	15,25	

CURRICULUM VITAE

Nom et prénom: Ben Jeddi Fayçal
Adresse postale: 43 Av. Charles Nicolle 1082 Tunis-Mahrajène, Tunisie
Téléphone: 216 98 36 36 21
E-mail: benjeddi_faysal@yahoo.fr
Lieu et date de Naissance: Hammam-Lif, 14 Janvier 1960
Nationalité: Tunisienne
Etat civil: marié, avec 2 enfants

EDUCATION

- 1992-2005: Préparation d'une Thèse de Doctorat, faculté des Sciences en Bio-ingénierie, Université de Gent, Belgique.
- 1983-1986: Cycle de Spécialisation de l'I.N.A.Tunisie, Département de Phytotechnie et Amélioration des plantes. Institut National Agronomique, Tunisie.
Mémoire: "Amélioration des ressources fourragères et énergétiques par les associations graminées-légumineuses en zones semi-arides"; Encadreur: Pr. M. Zouaghi
- 1979-1983: Cycle Ingénieur en Agronomie, Département de Phytotechnie et Amélioration des plantes. Institut National Agronomique, Tunisie.
Mémoire: "Analyse des systèmes fourragers dans la basse vallée de la Mejerda"; Encadreurs: Pr. M. Zouaghi et P. Tédjedor
- 1972-1979: Cycle de l'enseignement secondaire long, Lycée Technique de Rades, Tunisie
Baccalauréat: Diplôme en Maths-Sciences.
- 1965-72: Cycle de l'enseignement primaire, Ecole primaire rue de Libye, Tunisie
Sixième: concours d'entrée à l'enseignement du secondaire

INVENTION SCIENTIFIQUE

- 1989-1998: Amélioration du germoplasme du sulla sauvage dans le cadre de préparation du Doctorat
Lieu de la recherche: Laboratoire de Productions Fourragère et Pastorale de l'INA Tunisie, dirigé par Pr. M. Zouaghi
- 1998: Convention INAT-CCSPS pour la multiplication et la commercialisation de la nouvelle variété de sulla obtenue.
- 2001: Dépôt d'inscription de la nouvelle variété de sulla nommée "Bikra 21" au Catalogue Officiel sous le numéro 64 du 02 Juillet 2001, MO12997.

A. Publications

- Ben Jeddi, F., Zouaghi, M., et Harrabi, M. (1988) Influence d'*Agrobacterium rhizogenes* sur la nodulation de *Lupinus albus* et de *Vicia faba*. *Revue de l'INAT* **3**, 103-112.
- Ben Jeddi, F., Zouaghi, M., Harrabi, M., Strobel, G. A., et Hannaway, D. B. (1989) Nodulation of *Lupinus albus* and *Vicia faba* by *Rhizobium* spp. As influenced by *Agrobacterium rhizogenes*. *FEMS Microbiology* **59**, 77-82.
- Ben Jeddi, F. et Zouaghi, M. (1990) Effet de l'inoculation et de la fertilisation phosphorée sur le soja. *Revue de l'INAT* **5**, 125-134.
- Ben Jeddi, F. et Zouaghi, M. (1991) Productivité des associations orges-vesces dans les semi-aride inférieur de la Tunisie. *Revue de l'INAT* **6**, 25-36.
- Ben Jeddi, F., Zouaghi, M. et Moujahed, N. (1992) Qualité et productivité de neuf variétés de ray-grass. *Revue de l'INAT* **7**, 59-72.
- West, C. P. , Mc.Connel, M., Saidi, S., Ben Jeddi, F. et Charmet, G. (1992) Collection of endophyte-infected Festuca germplasm in western mediterranean countries. *Agronomy Abstracts* **501**, 575-3982.
- Ben Jeddi, F. (1996) "Perspectives de création de variétés autochtones du sulla du nord (*Hedysarum coronarium* L.)". In Actes de l'ACETEF. Cherchons ensemble. Hammamet 24-26 Mai 1996.
- Rouz, S., Ben Jeddi, F. et Zouaghi, M. (1997) Qualité et valeur alimentaire des médics en Tunisie. *Revue de l'INAT* **12**, 115-130.
- Rouz, S., Ben Jeddi, F. et Zouaghi, M. (1997) Productivité fourragère de divers écotypes de médics "*Medicago* spp." de Tunisie. *Revue de l'INAT* **12**, 115-130.
- Ben Jeddi, F., Sanaa, M. et Behaeghe, T. (1997) Contribution des légumineuses fourragères à l'amélioration de la réserve humique du sol. *Revue de l'INAT* **13** 95-105.
- Ben Jeddi, F., Zouaghi, M. et Behaeghe, T. (1998) Problématique le sulla sauvage. Biodiversité et création variétale. In Actes du 1^{er} séminaire international sur la Mobilisation, exploitation et conservation des ressources naturelles. M'hiri A. ed. Tunis 10-12 Novembre 1997. 387-397.
- Khriji, O., Ben Jeddi F., Zouaghi, M. et Rezgui, S. (2002). Etude en exploitation double fourrage /semences de divers génotypes améliorés du sulla local "*Hedysarum coronarium* L.". *Revue de l'INAT* **16**, 65-80.
- Mansour A., M. Chakroun, Ben Jeddi, F. et Zouaghi, M. (2002) Performance et qualité nutritionnelle de différents génotypes d'avoine en zone semi-aride supérieur de la Tunisie. *Revue de l'INAT* **17**, 129-151.

B. Présentations orales

Ben Jeddi, F. et Zouaghi, M. (1995) Biodiversité et amélioration génétique des génotypes spontanés du Sulla du nord "*Hedysarum coronarium* L.". Deuxièmes Journées nationales sur les récents acquis de la recherche agronomique et vétérinaire. Hammamet 8-10 Décembre 1995.

Ben Jeddi, F. (1996) Perspectives d'amélioration de la conservation du Sulla du nord par ensilage. Pôle de recherche-développement du nord-ouest sub-humide. Journée d'information sur l'ensilage. Bousalem 28 mars 1996.

Ben Jeddi, F., Sanaa, M. et Zouaghi, M. (1996) Effet des rotations des cultures sur le bilan de la matière organique dans le sol. Troisièmes journées nationales sur les récents acquis de la recherche agronomique et vétérinaire. Nabeul 29 Novembre-1^{er} Décembre 1996.

Ben Jeddi, F. (1997) Le Sulla sauvage: biodiversité et création variétale. Premier séminaire international sur la mobilisation, l'exploitation et la conservation des ressources naturelles. Tunis 10-12 Novembre 1997.

Ben Jeddi, F. (1997) Valorisation du Sulla sauvage: progrès génétique et création variétale. Quatrièmes journées nationales sur les récents acquis de la recherche agronomique et vétérinaire. Nabeul 28-29 Novembre 1997.

Ben Jeddi, F. (1998) Valorisation et promotion des écotypes locaux du sulla du nord. Journée nationale sur la promotion de la culture du sulla. OEP-ODESYANO. Corniche-Bizerte 03 Novembre 1998.

Ben Jeddi, F. (1999) Conduite et exploitation des cultures fourragères irriguées. Journée d'information sur les cultures fourragères. UTAP-Projet présidentiel pilote sur l'encadrement et la vulgarisation agricole à El Gobba-Nabeul. Bouchrick 04 Février 1999.

Ben Jeddi, F. (2000) La fixation symbiotique de l'azote atmosphérique et la fertilisation des légumineuses fourragères par l'azote minéral. Sidi Thabet 30 Mai 2000.

Ben Jeddi, F. (2001) Description et spécificités de la nouvelle variété de sulla du nord "Bikra 21". CCSPS-INAT. Mezez El Bab 05 Avril 2001.

Ben Jeddi, F. (2001) Les légumineuses fourragères source de production des protéines végétales. MAERH. CRDA de l'Ariana. Sidi Thabet 14 Novembre 2001.

Ben Jeddi, F. (2002) Installation et conduite des cultures fourragères hivernales. Journée d'information sur les fourrages d'hiver. MAERH. AVFA. Bousalem 23 Octobre 2002.

Ben Jeddi F. 2003. place du sulla du nord dans les systèmes de cultures durables. MAERH. AVFA. CFP Bousalem 15 Octobre 2003.

Ben Jeddi, F. 2004. Amélioration du sulla du nord spontané: création variétale, conduite et exploitation de la culture. 1^{ère} session de formation sur la place du Sulla "Bikra 21" dans les systèmes de culture . Sidi Thabet 29 Mars-02 Avril 2004.

C. Présentations de posters

Ben Jeddi, F. (1999) Spécificités de la nouvelle variété du sulla du nord nouvellement créée. Salon national des jeunes inventeurs. RCD. Tunis 18-22 Mars 1999.

Jammazi, M., Ben Jeddi F., Zouaghi, M., Rao, R. et Devicente, C. (2002) AFLP and RAPD markers for *Hedysarum* genus identification and for estimation of genetic variability within and between species. Giornate Scientifiche del Polo delle scienze e delle tecnologie per la vita. Facoltà di Medicina e Chirurgia, farmacia, Medicina Veterinaria e agraria. 6-7 juin 2002. Napoli. Italie.

Jammazi, M., Zouaghi, M., Ben jeddi, F. et Rao, R. (2003) Caractérisation moléculaire du genre *Hedysarum* et estimation de la variabilité génétique inter et intra spécifique par les marqueurs AFLP. 10ème journées sur les acquis de la Recherche Agronomique. Nabeul, décembre 2003.

PARTICIPATIONS A DES CONGRES, SEMINAIRES ET COURS INTERNATIONAUX

- Stage en herbage et production animale. Wageningen-Hollande, avril 1983.
- Techniques d'analyse sur Auto-analyser par Technicon.Tunis-Tunisie, octobre 1986.
- Fixation de l'azote atmosphérique. ICARDA, Meknès-Maroc, avril 1990
- Fixation biologique de l'azote et facteurs limitant. FAO, Le Caire-Egypte, Décembre 1990.
- Conservation des ressources génétiques fourragères et pastorales. ICARDA, FAO Rabat-Maroc, 1992
- Forum ACETEF sur les acquis de la recherche scientifiques. Hammamet-Tunisie, 1996.
- Les ressources génétiques des légumineuses. Rabat-Maroc, 1997
- Mobilisation et exploitation des ressources naturelles. Tunis, 1998.

ACTIVITES PROFESSIONNELLES

1986-1988: Ingénieur Principal, Laboratoire de Production Fourragère (INAT)
1988-1991 Assistant, Laboratoire de Production Fourragère (INAT)
1991--- Maître Assistant, Laboratoire de Production Fourragère (INAT)

1. Enseignement

- Cours:
 - Grandes cultures (1^{ère} année cycle ingénieur)
 - Cultures fourragères (2^{ème} et 3^{ème} années cycle ingénieur)
 - Systèmes fourragers (2^{ème} et 3^{ème} années cycle ingénieur)
- Travaux dirigés:
 - Systèmes fourragers (2^{ème} te 3^{ème} année cycle ingénieur)

- Travaux pratiques:

Cultures fourragères (2^{ème} et 3^{ème} année cycle ingénieur)

Travaux de ferme en grandes cultures (2^{ème} année cycle ingénieur)

Pratiques agronomiques (1^{ère} et 2^{ème} cycle ingénieur)

- Sorties:

Cultures fourragères (2^{ème} et 3^{ème} année cycle ingénieur)

Systèmes fourragers (2^{ème} et 3^{ème} années cycle ingénieur)

Voyage d'étude et de synthèse (3^{ème} année cycle ingénieur)

2. Encadrement

Séminaires, 1^{ère}, 2^{ème} et 3^{ème} année cycle ingénieur

projet de fin d'études du Cycle Ingénieur de l'INAT

Diplôme d'Etudes Approfondies de l'INAT

3. Activité diverses

- 1997: Membre de la commission technique chargée par le ministère d'agriculture pour le suivi de la campagne des grandes cultures.
- 1996-1998: Membre suppléant au sein des C.A.P.
- 1998: Membre du comité technique du Pôle régional de recherche développement du nord-est.
- 2000- présent Responsable d'un projet fédérateur sur l'amélioration du couple symbiote légumineuses-Rhizobium. IRESA, MAERH Tunisie.

