

**UNIVERSITE SAAD DAHLAB - BLIDA 1**  
**Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie**  
Département des Biotechnologies

**THESE DE DOCTORAT**

En Sciences Agronomiques

ETUDE DU POTENTIEL DE LA VEGETATION STEPPIQUE DANS  
LA LUTTE CONTRE LA DEFLATION EOLIENNE

Par

**Hamida MALLEM**

Devant le jury composé de :

Z. DJAZOULI	Professeur, U. Blida1	Président
A . DELLAL	Professeur, U. Tiaret	Examineur
C. CHAOUIA	Maitre de conférences A, U. Blida1	Examinatrice
M. BAHA	Professeur, E.N.S Kouba	Examinatrice
M. KOUIDRI	Maitre de conférences A, U. Laghouat	Examineur
A. BENRIMA	Professeur, U. Blida1	Promotrice

Blida, juin 2018

## RESUME

En zones arides, les labours et le surpâturage accentuent le risque de dégradation des parcours steppiques, l'ensablement et l'érosion éolienne en sont les conséquences, des plantes disparaissent et d'autres persistent et arrivent à s'adapter. Nous avons visé dans la présente étude, à recenser les plantes steppiques pouvant croître dans un milieu ensablé et de rechercher leurs niveaux de distributions sur les dunes de sables et aussi leurs effets sur le sol dunaire.

Nous avons réalisé des inventaires de la végétation dans la zone de Mokrane (wilaya de Laghouat) durant la période de 2009 à 2015. Nous avons calculé les paramètres écologiques, l'équilibre écologique du milieu et la valeur pastorale en utilisant la méthode du transect (relevé floristique), nous avons réalisé une AFC pour comprendre la structuration du milieu. La hauteur des dépôts éoliens fixés a été mesurée sous toutes les espèces végétales inventoriées dans la zone d'étude après la correction de la pente par la méthode du nivellement topographique. Sous trois plantes vivaces (*Retama raetam*, *Aristida pungens* et *Astragalus armatus*) ; la texture, les caractéristiques physiques et microbiologiques du sol ont été analysées et comparées à celles de sol dunaire sans végétation.

Nous avons identifié 30 espèces végétales. Les deux principaux facteurs influençant la répartition des espèces végétales dans le site, ont été l'ensablement et les pratiques agricoles. Après 6 années de suivi le milieu a demeuré peu diversifié et perturbé. Le taux du sable a diminué par rapport au recouvrement végétal. L'*Astragalus armatus*, plante non palatable a proliféré largement dans le milieu. Les hauteurs des dépôts éoliens fixés par les plantes ont été entre (28 cm et 63 cm), valeurs inférieures à celles des dépôts non fixés qui ont été entre (36 cm et 97cm). En ce qui concerne les trois plantes vivaces, les élévations des dépôts éoliens sous-jacents n'ont pas été différentes statistiquement ; notant qu'*A. pungens* a montré

les valeurs les plus basses jusqu'à 29 cm. Les dépôts éoliens dans Mokrane ont formé des micros dunes qui n'ont pas dépassé 1 m.

Les résultats des caractéristiques du sol dunaire fixé et non fixé, ont été différents ; la micro dune sous *A. pungens* ne contenait pas de limon et d'argile (0%). La micro dune fixée par *A. armatus* contenait plus de limon et d'argile avec respectivement (9%, 10%). La micro dune du sol fixée par *R. raetam* a montré les teneurs les plus élevées en N, en C et en richesse bactérienne avec respectivement (0,08%, 0,82%,  $1.21 \times 10^5$  ufc / g). La micro dune fixée par *A. pungens* a présenté une teneur élevée en  $\text{CaCO}_3$ , la conductivité électrique et la richesse fongique avec respectivement (2,37%, 0,92 ms / cm et  $0.63 \times 10^5$  germes / g).

Nous avons constaté à la fin de cette étude les effets particuliers de chaque plante, dans la réhabilitation des sols dégradés, l'association de ces plantes a présenté une complémentarité remarquable, ceci pourrait être utilisé pour le control de l'érosion éolienne.

**Mots Clés** : érosion éolienne, hauteur de dune, végétation, sable, zone aride,

## Abstract

In arid zones, plowing and overgrazing accentuate steppe degradation risk, silting and wind erosion are the consequences, plants disappear and others persist and adapt. We aimed in this study, to identify steppic plants that can grow in a silted environment and to find their distribution levels on the sand dunes and their effects on soil dune.

We carried out vegetation inventories in the Mokrane area (Laghouat city) during the period from 2009 to 2015. We calculated the ecological parameters, the balance of the environment and the pastoral value using the floristic transect method. We did CFA to understand environment structuring. The height of the fixed wind deposits was measured under all plant species inventoried in the study area after slope correction by the topographic leveling method. Under three perennial plants, dunes fixers (*Retama raetam*, *Aristida pungens* and *Astragalus armatus*); the texture, physical and microbiological soil characteristics, were analyzed and compared to those of dune soil without vegetation.

We identified 30 plant species. The two main factors influencing the distribution of plant species in the site were silting and agricultural practices. After 6 years of monitoring, the environment remained undeveloped and disturbed. The sand rate has decreased relative to vegetation cover. The non-palatable *Astragalus armatus* has proliferated widely in the environment. The heights of Aeolians deposits fixed by the plants were between (28 cm and 63 cm); values lower than those of the not fixed deposits, which were between (36 cm and 97cm). For the three perennial plants, statistically the underlying aeolian deposits elevations were not different; noting that *A. pungens* showed the lowest values up to 29 cm. Aeolian deposits in Mokrane formed microdune that did not exceed 1 m.

The results of fixed and unfixed dune soil characteristics were different; the micro dune under *A. pungens* did not contain silt and clay (0%). The micro dune fixed by *A. armatus* contained more silt and clay with respectively (9%, 10%). The micro-dune of the soil fixed by *R. raetam* showed the highest contents in N, in C and in bacterial richness with respectively (0,08%, 0,82%,  $1,21 \times 10^5$  ufc / g). The micro dune fixed by *A. pungens* showed a high content of CaCO<sub>3</sub>, the electrical conductivity and the fungal richness with respectively (2.37%, 0.92 ms / cm and  $0.63 \times 10^5$  germ / g).

We noted at the end of this study, the particular effects of each plant in the rehabilitation of degraded soils, the association of these plants had a remarkable complementarity, which could be used to control wind erosion.

**Key words:** arid zones, dune height vegetation, sand, wind erosion.

## ملخص

في المناطق القاحلة، يؤدي الحرث والرعي الجائر إلى زيادة تدهور السهوب، انجراف التربة وتكوين الكثبان الرملية هم من بين العواقب. تختفي بعض النباتات، وتنمو وتتكيف أخرى. وقد استهدفنا من خلال هذه الدراسة الى التعرف على نباتات السهوب التي يمكن أن تنمو في بيئة مفلّنة، وإيجاد مستويات توزيعها على الكثبان الرملية وآثارها على خصائص تربة هذه الأخيرة.

قمنا بتنفيذ احصاء نباتي في منطقة مقران بالأغواط خلال الفترة من سنة 2009 إلى 2015 بحساب المعايير البيئية، والتوازن البيئي، والقيمة الرعوية باستخدام طريقة القطاعات الخطية، قمنا أيضا بحساب التحليل العملي الاحصائي لفهم بنية التوزع النباتي في المنطقة.

تم ايضا قياس ارتفاع رواسب الرياح الثابتة تحت جميع أنواع النباتات المحصاة في منطقة البحث بعد تصحيح المنحدرات بواسطة طريقة التسوية الطبوغرافية. تحت ثلاثة نباتات معمرة (*Retama raetam*: الرتم ، *Aristida pungens*: الدرّين، *Astragalus armatus*: القندال) . تم تحليل نسيج التربة والخصائص الفيزيائية والمكروبيولوجية ومقارنتها مع التربة الرملية دون الغطاء النباتي .

حددنا 30 نوعا من النباتات. وكان العاملان الرئيسيان اللذان يؤثران على توزيع أنواع النباتات في الموقع هما : زحف الرمال والممارسات الزراعية. وبعد 6 سنوات من الرصد، ظلت البيئة قليلة التنوع. في حين انخفض معدل غطاء الرمل بالنسبة إلى الغطاء النباتي. وقد انتشرت على نطاق واسع *Astragalus armatus* وهي نبتة غير مستساغة في المراعي.

كانت ارتفاعات رواسب التعرية التي ثبتتها النباتات بين (28 سم و 63 سم)، وهي قيم أقل من الرواسب غير الثابتة التي تراوحت بين (36 سم و 97 سم). أما بالنسبة للنباتات المعمرة الثلاث، فإن ارتفاعات رواسب التعرية الكامنة لم تكن مختلفة إحصائيا؛ مشيرا إلى أن نبات *A.pungens* قد سجّل أدنى القيم حتى 29 سم. شكلت رواسب التعرية في منطقة مقران كثبانا رملية صغيرة لم

تتجاوز 1 م. وكانت نتائج خصائص التربة للكثبان الصغيرة الثابتة وغير الثابتة مختلفة؛ فإن الكثبان الرملية المثبتة بنبات *A. pungens* لم تحتوي اطلاقا على الطمي والطين (0%). في حين سجلت الكثبان المثبتة بنبات *Astragalus armatus* النسب الأعلى من الطمي والطين (9%، 10%) على التوالي.

أظهرت التحاليل لتربة الكثبان تحت نبات *Retama raetam* أعلى محتوى فينسب الازوت و الكربون والبكتيريا (0,08%, 0,82%,  $1.2110^5$  خلية / غ) على التوالي، وأظهرت الكثبان الرملية التي حددها نبات *A. pungens* أعلى نسبة في ما يخص نسبة  $CaCO_3$  ، و نسبة الاملاح والفطريات (2.37%, 0.92 ms / سم و  $0.63 \times 10^5$  خلية/ غ) على التوالي .

وقد لاحظنا في نهاية هذه الدراسة التأثيرات الخاصة لكل نبات، في إعادة تأهيل التربة المتدهورة، وكان لاشتراك هذه النباتات تكامل ملحوظ، وهو أمر يمكن استخدامه للسيطرة على تآكل الرياح.

**الكلمات الدالة:** المناطق الجافة، الغطاء النباتي، الرمال، ارتفاع الكثبان الرملية، تآكل الرياح

## REMERCIEMENTS

Je tiens à adresser mes sincères remerciements à :

Mme BENRIMA- GUENDOZ Atika, Professeur à l'université Blida 1, pour son encadrement, ses jugements très pertinents et surtout pour la patience et la confiance qu'elle m' a toujours accordé, grand merci très chère.

Mr DJAZOULI Zahreddine, Professeur à l' Université de Blida 1, pour l'honneur qu'il me fait de présider le jury et d'évaluer cette thèse ; qu'il trouve ici l'expression de ma grande reconnaissance pour son encouragement .

Mme BAHA Mounia Professeur à l'ENS Kouba, merci pour ses corrections et orientations, je lui adresse mes respectueuses considérations.

Mme CHAOUIA Cherifa , MCA à l'université de Blida 1, mon enseignante , très heureuse que vous soyez parmi les examinateurs, merci d'avoir accepter de juger ce travail.

Mr DELLAL Abdelkader, Professeur à l'Université de Tiaret, pour avoir accepté de juger et d'apporter ses appréciations à mon travail, je lui adresse mes respectueuses considérations.

Mr KOUIDRI Mohamed , maitre de conference à l'Université U.A.T.L de Laghouat, pour avoir accepté de juger et d'apporter ses appréciations à mon travail, je lui adresse mes respectueuses considérations.

Cette thèse a été réalisée dans le cadre des travaux de recherche du laboratoire de recherche, Biotechnologie des production végétales Blida 1, dont je remercie infiniment son directeur, le Professeur Snoussi Sid ahmed , ainsi que tout son personnel technique, pour les aides et les facilités qu'ils m'ont octroyé pour la réalisation de ce travail.



Cette thèse a été réalisée grâce au soutien financier de la communauté Wallonie Bruxelles et la CGRI. Elle conclut plusieurs années de labeur et de collaborations intenses. J'adresse mes plus vifs remerciements à toutes les personnes qui ont pris part de près ou de loin à sa finalisation.

J'exprime ma profonde reconnaissance aux professeurs Charles Biolders et Renate Wesslingh initiateur du travail, qui ont guidé nos premiers pas dans le domaine de l'érosion éolienne, merci de m'avoir accordé l'occasion pour effectuer ce travail de recherche. Ils ont su m'aider tout au long de ces années à construire la réflexion et à franchir les caps difficiles. Merci d'avoir fait preuve de patience et d'une attention particulière.

Je remercie infiniment mes chers amis de l'équipe désertification et climat Houyou zohra, koudri mohamed ( Laghouat), Djamila Ameer et ceux de Blida : Amad faiza, sidali Ramdane, karima Aouess et Zouaoui ahmed .

Grand merci à mon cher mari Filali Ali pour son aide et sa patience ; mes defuns parents et ma famille en particulier Sabah nakkab.

Sans oublier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Hamida MALLEM (Epoque Filali)

## TABLE DES MATIERES

RESUME	1
ABSTRACT	3
ملخص	5
REMERCIEMENTS	7
TABLE DES MATIERES	9
LISTE DES ILLUSTRATIONS GRAPHIQUES ET DES TABLEAUX	11
INTRODUCTION	13
1. GENERALITES SUR LA STEPPE ALGERIENNE	17
1.1. Définition de la steppe	17
1.2. Situation géographique	17
1.3. Caractéristiques climatiques	18
1.4. Caractéristiques pédologiques	19
1.5. La végétation steppique	19
1.6. Hydrographie et ressources hydriques	20
1.7. La population humaine	21
1.8. Le cheptel	21
1.9. Occupation des terres et ressources fourragères	23
1.10. Etat de la steppe Algérienne	23
1.11. Présentation de quelques plantes steppiques	29
2. EROSION EOLIENNE	35
2.1. Définition de l'érosion éolienne	35
2.2. Les processus de l'érosion éolienne	35
2.3. Facteurs influençant l'érosion éolienne	37
2.4. Conséquences de l'érosion éolienne	40
2.5. Lutttes contre l'érosion éolienne	42
3. MATERIEL ET METHODES	47
3.1. Présentation de la zone d'étude	47
3.2. Etude floristique de la zone ensablée de Mokrane	56
3.3. La productivité pastorale de la zone de Mokrane	61
3.4. Mesure de la hauteur des sédiments accumulés sous et hors de la canopée	63
3.5. Caractéristiques du sol sous la végétation et hors végétation	67
3.6. Traitements statistiques des données	73
4. RESULTATS ET DISCUSSION	74
4.1 Résultats	74
4.1.1 Etude floristique	74
4.1.1.1 L'étude pastorale de la zone de Mokrane	81

4.1.2 La hauteur des sédiments Accumulés sous et hors canopée	83
4.1.3 Caractéristiques du sol sous et hors végétation (hors canopée)	85
4.1.3.1 Granulométrie	85
4.1.3.2 Caractéristiques physiques	86
4.1.3.3 Caractéristiques microbiologiques	87
4.2 Discussion	89
4.2.1 Végétation	89
4.2.2 Hauteur des sédiments accumulés sous et hors de la canopée	94
4.2.3 Caractéristiques du sol sous et hors de la canopée	95
CONCLUSION	100
APPENDICE	103
A. Liste des abréviations	103
B. Cordonnées de localisation des 12 relevés linaires	104
C. Physionomie de la végétation dans la zone de Mokrane en année 2009	105
D. Résultats de l'AFC et de CHA	106
E. Test de bootstrap ( $P \leq 5\%$ ) comparant la diversité entre les années	107
F. Contributions des espèces et Indices des valeurs pastorales (2009-2015)	108
G. Recouvrement de la végétation de la zone de Mokrane , année 2015	109
H. Normes d'interprétation de l'analyse du sol	110
REFERENCES	111

## LISTE DES ILLUSTRATIONS GRAPHIQUES ET DES TABLEAUX

Figure 1.1	Délimitation des steppes algérienne	22
Figure 1.2	<i>Retama raetam</i>	29
Figure 1.3	<i>Aristida pungens</i> L.	31
Figure 1.4	<i>Astragalus armatus</i>	32
Figure 2.1	Illustration des modes de transport pendant un évènement érosif	36
Figure 2.2	Principales formations éoliennes mobiles	42
Figure 2.3	Palissade à base de palmes pour fixer le sable	45
Figure 3.1	Localisation de la zone de Mokrane dans la wilaya de Laghouat	48
Figure 3.2	Cadre géologique de la zone d'étude	49
Figure 3.3	Les différentes unités identifiées sur le terrain	50
Figure 3.4	La fréquence de la direction des vents	51
Figure 3.5	Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gausсен de la période (1996-2016)	53
Figure 3.6	Climagramme pluviothermique d'Emberger pour la région de Laghouat (1996 -2016) de la région de Laghouat	55
Figure 3.7	Répartition et localisation des transects par rapport à la direction des vents dominants	56
Figure 3.8	Instruments utilisés pour mesurer la hauteur des sédiments accumulés	64
Figure 3.9	Schéma démontrant la méthode de nivellement pour calculer la hauteur (h) des sédiments accumulés	65
Figure 3.10	Exemple de correction de la pente du terrain pour le calcul de la hauteur h des sédiments accumulés	66
Figure 3.11	Représentation des hauteurs calculées (h) des sédiments accumulés.	67
Figure 4.1	Répartition des familles des espèces végétales dans la zone de Mokrane	74
Figure 4.2	Evolution du Spectre biologique réel de la végétation dans la zone de Mokrane (2009-2012-2015)	76
Figure 4.3	Spectre phytogéographique de la végétation dans la zone de Mokrane	77
Figure 4.4	Répartition des groupements végétaux sur les axes 1-2 de l'analyse factorielle (AFC)	78
Figure 4.5	Suivi du recouvrement et des précipitations de la zone de Mokrane (2009-2015)	80
Figure 4.6	Suivi de la prolifération des 3 espèces vivaces dans la zone de Mokrane.	81
Figure 4.7	Fréquence des sédiments accumulés fixés et non fixés	83

Figure 4.8	Hauteur (m) des sédiments accumulés sous et hors végétation.	84
Figure 4.9	Fractions des particules minérales des sédiments accumulés sous et hors canopée	85
Figure 4.10	Richesse microbienne de sédiments accumulés sous et hors de la canopée.	88
Figure 4.11	Les deux premiers axes d'ACP montrant la relation entre les caractéristiques du sol et les plantes	98
Tableau 1.1	Les effectifs des animaux d'élevage national et de la zone steppique en 2006	22
Tableau 1.2	La répartition des parcours steppiques en 2005	23
Tableau 2.1	Répartition des superficies affectées par la dégradation des terres en Afrique (M ha).	35
Tableau 2.2	Facteurs clés influençant l'érosion éolienne dans un contexte sahélien	37
Tableau 3.1	Moyennes mensuelles des données climatiques de la période (1996-2016) de la région de Laghouat.	51
Tableau 4.1	Liste des plantes steppiques recensées (2009 -2015) dans la zone de Mokrane	75
Tableau 4.2	Test de « bootstrap » comparant la diversité des communautés végétales (année 2009)	78
Tableau 4.3	Indices de la diversité floristique du milieu durant les années 2009-2012-2015	79
Tableau 4.4	Evaluation de la productivité pastorale et la charge pastorale de la zone de Mokrane comparée à ceux de Nedjraoui (2002) et URBT (1987) .	82
Tableau 4.5	Evolution de la productivité pastorale de la zone de Mokrane durant les années (2009 -2012 - 2015).	83
Tableau 4.6	Moyennes $\pm$ écart-type des propriétés physiques et physicochimiques du sol sous et hors canopée	86

## INTRODUCTION

L'Afrique du Nord est l'une des régions les plus fragilisées par les conséquences de l'aridité climatique et par l'impact des activités humaines sur le milieu naturel. Les zones steppiques d'Afrique du Nord sont particulièrement concernées par les problèmes de désertification [1]. En Algérie, au Maroc et en Tunisie, la part des territoires nationaux affectés par la désertification est estimée à plus de 80% au début des années 1980 [2]. De même, la carte de sensibilité à la désertification établie par le Centre National Algérien des Techniques Spatiales révèle que sur la totalité de la superficie de la steppe algérienne, 53 % est classée comme zone sensible à très sensible à la désertification [3]. En Algérie, en dehors de la zone saharienne, ce sont surtout les hautes plaines qui sont les plus touchées par le phénomène d'ensablement 500000 ha de formations éoliennes s'étendent au Nord de l'Atlas saharien [4]. Près de 600000 ha de terres en zones steppiques sont totalement désertifiées sans possibilité de remontée biologique et près de 6 millions d'hectares sont menacées par les effets de l'érosion éolienne [5]. La désertification y gagne du terrain du fait d'une sécheresse récurrente, de la surcharge pastorale et de l'extension d'une agriculture pluviale et parfois irriguée, inadaptée aux conditions du milieu naturel [6]. Les espèces ligneuses qui retiennent le sol sont détruites et sont remplacées par des espèces adventices moins efficaces face à l'érosion éolienne [7].

Les steppes à psammophytes sont liées à la texture sableuse des horizons de surface et aux apports d'origine éolienne, elles suivent les couloirs d'ensablement et se répartissent également dans les dépressions constituées par les chotts, elles sont plus fréquentes en zones arides et présahariennes, elles forment des steppes à *Stipagrostis pungens* et *Thymelaea microphylla* ou encore des steppes arbustives de *Retama raetam* et leurs valeurs pastorales varient de 200 à 250 UF/ha [8].

Selon les résultats du programme ROSELT de 2003, les psammophiles qui étaient inexistantes en 1978 à l'Ouest ont connu une extension due à un ensablement plus important durant la période de sécheresse de 1981-87. Le recouvrement de la végétation psammophyte est souvent supérieur à 30 % grâce à la prolifération des espèces annuelles [9]. Les dunes de sable sont caractérisées par la présence d'une couverture végétale, de densité variable, qui fixe plus ou moins leur sable, Les sols dunaires sont généralement pauvres en éléments nutritifs et en eau [10].

Les problèmes de tempêtes de sable sont devenus très aigus dans les pays arides et semi arides, en particulier en Afrique du Nord [4]. L'érosion éolienne est un important facteur physique causant l'épuisement des terres agricoles [11, 12], en raison de la grave dégradation de l'environnement et notamment l'appauvrissement des sols [13].

Les espaces inter-plantes stériles génèrent l'érosion des sols par le vent et les pertes d'éléments nutritifs dans le paysage [14,15]. Dans un environnement ouvert où la végétation a une couverture d'environ 30 %, le vent fonctionne en transportant des particules fines comme le sable et l'argile et laisse derrière lui un sol pierreux et squelettique (reg ou hamada). Cette érosion entraîne une perte de sol d'environ 150 à 300 tonnes par ha par an dans les steppes déboisées [16].

L'extension des labours et l'introduction de la mécanisation sont des facteurs importants de dégradations plus le surpâturage. Les techniques utilisées par les agriculteurs éleveurs ont une action érosive sur le sol, en détruisant l'horizon de surface et en stérilisant le sol souvent de manière irréversible [17].

Dans les écosystèmes arides et semi-arides, où les variations et la disponibilité de l'eau et des nutriments sont extrêmes, les buttes de sable ou nebkhas causent des changements dans les propriétés du sol et du microclimat [18].

De nombreuses études ont mis l'accent sur l'importance géomorphologique ou pédologique des Nebkhas dans les zones arides et côtières [14, 19].

BISHOP *et al.* [20], ont modélisé les champs de dunes désertiques basées sur la dynamique discrète du sable. WANGA *et al.* [21] ont effectué une recherche sur le développement de la Nebkha et son importance dans le domaine de l'érosion éolienne et la dégradation des terres dans les zones semi-arides. BURRI *et al.* [22] ont étudié l'efficacité des plantes dans le piégeage des sédiments générés par l'érosion éolienne, ERKTAN *et al.* [23] ont réalisé la même étude pour l'érosion hydrique. BARCHYN et HUGENHOLTZ [24] ont examiné la stabilité et l'évolution des dunes en relation avec le climat et la végétation. OLA *et al.* [25] ont étudié l'action des racines des plantes pour minimiser les effets de l'érosion hydriques des sols. La taille, la forme et l'architecture de la canopée de la plante hôte du sable fixé ont été considérées comme une clé importante affectant la taille de l'accumulation de sable dans plusieurs régions arides et semi-arides [19,26, 27, 28].

La rugosité du sol et l'inclinaison ont une influence significative sur l'indice de la hauteur de la dune [19, 29]. ZARNETSKE *et al.* [30] ont observé que les espèces végétales diffèrent dans leur capacité à capturer le sable, les espèces autochtones ont une capture de sable plus élevée que les espèces allochtones. DURAN *et al.* [31] ont observé généralement une croissance préférentielle de la végétation dans les zones des dépôts des dunes de sable. BARCHYN et HUGENHOLTZ [24] ont expliqué que si la végétation poussait sur la face de la pente, elle empiéterait par la suite la crête de la dune, entraînant sa stabilisation. BURYLO *et al.* [32] ont montré la capacité des plantes à renforcer le sol et à réduire le taux d'érosion, en piégeant les sédiments, cette capacité a été positivement corrélée à la surface foliaire, la densité de la canopée et aux fines racines.

Pour lutter contre l'érosion éolienne, plusieurs études ont été faites ; sur la fixation mécanique et biologique des dunes de sable, les types d'accumulations sableuses, la dynamique des sables, la quantification du sable, des recherches sur les modèles de mesure de l'érosion éolienne et des études sur le piégeage des sables par la végétation. Toutes les études précitées ont mis l'évidence sur des résultats de recherches dans des milieux contrôlés. La plantation des plantes exogènes pour fixer les dunes, peut menacer les milieux pour devenir des plantes invasives. De ce fait nous avons posé la problématique sur la présence naturelle de



certaines plantes dans des zones ensablées et fragiles, les questions posées ont été : quelles sont ces plantes et comment réagissent elle dans ces milieux.

HOUYOU et *al.* [33] ont signalé que les tempêtes de sable (vitesse du vent supérieure à 6,3 m/s) ont provoqué des pertes en sol de 75,32 t/ha/an, dans la zone de Mokrane (Wilaya de Laghouat) dans la steppe algérienne causé par les défrichements et les labours. Suite aux résultats de ces derniers nous avons visé à étudier l'environnement de cette zone ( zone de Mokrane) en faisant un inventaire des plantes spontanées qui colonisent les accumulations sableuses, nous avons aussi visé à mesurer la hauteur des accumulations sableuses fixées par ces plantes, ce qui a fait l'originalité de notre étude. Enfin nous avons voulu compléter notre recherche par l'étude des caractéristiques du sol, après installation de la végétation naturelle, nos résultats pourraient être utilisés pour le control de l'érosion éolienne.

Notre thèse est scindée en 4 chapitres répartis comme suit :

Chapitre 1 : Généralités sur la steppe algérienne.

Chapitre 2 : Erosion éolienne

Chapitre 3 : Matériel et méthodes

Chapitre 4 : Résultats et discussion

Nous avons terminé notre thèse par une conclusion et des perspectives

## **CHAPITRE 1**

### **GENERALITES SUR LA STEPPE ALGERIENNE**

#### 1.1. Définition de la steppe

La steppe, en région méditerranéenne, est une formation basse et ouverte, dominée par des xérophytes en touffes, laissant paraître le sol nu dans des proportions variables. En fonction du végétal dominant, qui peut être herbacé ou ligneux (sous-arbrisseaux), il est possible de reconnaître différents types de steppes qui peuvent exister en formation pures ou en mélange [16].

Selon MANIERE et CHAMIGNON [34], le terme « steppe » évoque d'immenses étendues arides couvertes d'une végétation basse et clairsemée.

En Algérie les milieux steppiques, sont marqués par une grande diversité paysagère en relation avec une grande variabilité des facteurs écologiques. Régions à vocation pastorale, la population est composée essentiellement de pasteurs-éleveurs, anciennement nomades pour la plupart, avec une forte tendance à la sédentarisation [35].

#### 1.2. Situation biogéographique

La steppe algérienne est située entre les isohyètes 400 mm et 100 mm dans l'Algérie du Nord. Elle couvre l'ensemble des hautes plaines (1000 à 14000m d'altitude) sur une superficie de 20 millions d'hectares entre la limite sud de l'Atlas Tellien et le piémont sud de l'Atlas Saharien (figure 1.1). La steppe est répartie administrativement à travers 08 wilayas steppiques et 11 wilayas agro-pastorales totalisant 354 communes [36].

Le climat varie du semi-aride inférieur frais au nord à l'aride inférieur tempéré au sud [37].

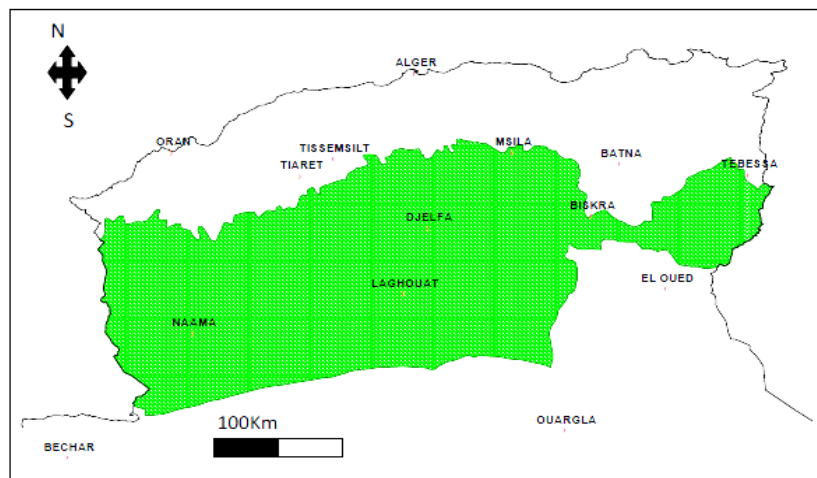


Figure 1.1 : Délimitation des steppes algérienne [38]

### 1.3. Caractéristiques climatiques

Les steppes se caractérisent par un climat de type méditerranéen avec une saison estivale sèche et chaude alternant avec une saison hivernale pluvieuse, fraîche sinon froide. La diminution et l'irrégularité accrue des pluviosités ainsi que l'augmentation des températures et de la longueur des périodes de sécheresse estivale rendant encore plus difficiles les conditions de développement des plantes avec un bilan hydrique déficitaire [39].

Selon la classification faite par Le HOUEROU [40], la steppe algérienne a une amplitude thermique annuelle généralement supérieure à 20°C. Une autre caractéristique du climat steppique est le vent violent. En effet, celui de l'hiver occasionne des dégâts ; celui de l'été venant du Sahara (sirocco), est le plus catastrophique ; est un vent chaud qui souffle de 20 à 30 jours par an et a des effets dégradants sur la végétation.

#### 1.4. Caractéristiques pédologiques

Les sols steppiques sont peu profonds et pauvres en matières organiques, caractérisés par une forte sensibilité à l'érosion et à la dégradation. Les bons sols sont destinés à une céréaliculture aléatoire [41].

La plus part des sols steppiques sont caractérisés par la présence d'accumulation calcaire réduisant la profondeur de sol ; ils sont généralement pauvres en matière organique et sensibles à la dégradation. Les bons sols dont la superficie est limitée, se situent au niveau des dépressions (sols d'apport alluvial) soit linéaire et constituées par les lits d'oueds soit fermées et appelées Dayas [39].

Selon HALITIM [42], les principaux types de sols des zones arides sont :

- Les sols minéraux bruts (lithosols et régosols) localisés sur les sommets des djebels.
- Les sols peu évolués regroupant les sols d'origines, colluviale des glacis, alluviales des lits d'oueds et des dayas et éolienne des formations sableuses fixées.
- Les sols calcimagnésiques caractérisés par des rendzines sur les versants des djebels, les sols bruns calcaires à accumulations calcaires, très répandus, et les sols à encroûtement gypseux, plus rares.
- Les sols isohumiques sont caractérisés par les glacis d'érosion et les sols halomorphes qui occupent les chotts et les sebkhas.

#### 1.5. La végétation steppique

Les écosystèmes steppiques sont subdivisés en deux grands ensembles : un premier ensemble couvrant 15 millions d'hectares représentés par une végétation steppique constituant les vraies zones de parcours à vocation pastorale et un second ensemble couvrant 5 millions d'hectares occupés par les cultures, les forêts et le sol nu, sables et sebkhas [38].

Les steppes peuvent revêtir diverses physionomies et structures. On peut ainsi distinguer des steppes graminéennes, arbrissellées, arbustives,

crassuléscentes, succulentes et pulvinées [16]. La végétation steppique est de très inégale valeur, tant pour sa composition floristique que par sa densité [43]. La végétation steppique est dominée par l'Alfa (*Stipa tenacissima*) qui occupe 4 millions d'hectares, suivie par le Chih (*Artemisia herba alba*) avec 3 millions d'hectares, puis le Sennagh (*Lygeum spartum*) et le Guettaf (*Atriplex halimus*) en association, avec respectivement 2 et 1 million d'hectares, le reste est occupé par des associations diverses (*Aristida pungens*, *Thymelaea microphylla*, *Retama raetam*, *Artemisia campestris*, *Arthrophytum scoparium* et *Peganum harmala*) [38].

Selon DJEBAILI [44], la combinaison des facteurs pédo-climatiques et la répartition spatiale de la végétation fait ressortir trois types de steppes :

- La steppe graminéenne à base d'Alfa (*Stipa tenacissima*) et/ou de Sparte (*Lygeum spartum*) que nous trouvons dans les sols argileux à texture plus fine. Sur les sols sableux, nous trouvons la steppe à Drinn (*Aristida pungens*).
- La steppe à chamaephytes représentées par l'armoise blanche (*Artemisia herba alba*) qui occupe les sols à texture fine.
- La steppe à halophytes ou crassuléscentes qui occupe les terrains salés. On y trouve *Atriplex halimus*, *Salsola vermiculata* et *Suaeda fruticosa*.

#### 1.6. Hydrographie et ressources hydriques

Le réseau hydrographique est fortement influencé à la fois par les variations saisonnières et interannuelle de la pluviométrie et aussi le relief de la steppe [45]. La plupart des oueds de la steppe sont irréguliers, secs en été avec toutefois des crues violentes le plus souvent en début et à la fin de l'hiver, et parfois en été. Ces crues causent beaucoup des problèmes d'érosion des terres et aussi de perte non négligeable de nombre de têtes des animaux qui pâturent. La plupart des oueds de la steppe ne poursuivent jamais leurs cours jusqu'à la mer et se perdent dans les grandes dépressions et chotts [36].

Selon MADR [36], les ressources hydriques sont constituées par :

- Les eaux superficielles provenant des précipitations orageuses et qui représentent un volume annuel de 40 milliards de m<sup>3</sup> dont une infime partie est mobilisée par des ouvrages, l'essentiel des apports disparaît par évaporation et infiltration.
- Les eaux souterraines dont le potentiel est évalué à 1,4 milliard de m<sup>3</sup> et qui constitue la seule ressource fiable, utilisée pour les besoins humains, l'abreuvement du cheptel et l'irrigation des cultures.

### 1.7. La population humaine

La population steppique représentait 11% de la population algérienne totale au dernier recensement de la population et de l'habitat (R.G.P.H) effectué en 1987.

Une forte croissance démographique est enregistrée durant la dernière moitié du siècle. La population de la steppe qui était de 900 milles habitant en 1954, est estimée à plus de 07 millions d'habitants en 1999 [46].

Selon BEDRANI [47], la population steppique est passée du simple au plus que le double en l'espace de 20 ans. Elle a passé en effet, de 1024777 à 2520207 habitants entre 1966 et 1987. La population steppique se caractérise par un taux de croissance supérieur à celui de la population algérienne totale. Entre 1966 et 1987, le taux de croissance du premier est 59,33% tandis que pour la seconde il est de l'ordre de 48,83%. En effet, « du fait de la ruralité de la population steppique, sa croissance a été plus rapide que celle déjà considérable, de la population totale.

### 1.8. Le cheptel

La steppe algérienne recèle dans ses replis une diversité de ressources biologiques végétales et animales. Riche en strate herbacée, elle constitue ainsi un espace à vocation pastorale et un véritable berceau de l'élevage ovin. Elle abrite un cheptel ovin estimé à plus de 18 millions de têtes en 2009 (ONS) sur les 21,4 millions de l'Algérie. Les parcours steppiques constituent la principale source de l'alimentation du bétail, bien qu'ils soient très dégradés et difficiles à prévoir d'une année à l'autre [48].

Nul ne peut contester l'importance de l'élevage ovin en milieu steppique. Il constitue une ressource rémunératrice de premier choix pour les éleveurs de la région. Actuellement, cet élevage a complètement changé de visage. Les éleveurs qui pratiquaient la transhumance et ou le nomadisme tendent actuellement à réduire leurs déplacements ou encore à se sédentariser [49]. Leur nombre a augmenté considérablement mais l'effectif moyen de leur troupeau se voit en régression. De tels bouleversements ont exercé une pression sur la steppe et les parcours se sont dégradés. Les causes de cette dégradation sont nombreuses, mais généralement peu ordonnées et les ressources alimentaires se sont raréfiées face à une demande croissante. Les systèmes d'élevage passent ainsi d'un mode type pastoral à un mode type agro-pastoral et la conduite alimentaire se généralise par la complémentarité sur parcours [50].

L'effectif du cheptel présentant dans la steppe a été de 10 804 261 de têtes (tableau 1.1). En premier lieu les ovins avec 9 413 342 têtes, soit 87 % du cheptel total de la steppe et de 48% du cheptel ovin national [36].

Tableau 1.1 : Les effectifs des animaux d'élevage national et de la zone steppique en 2006

<b>Espèce</b>	<b>Ovin</b>	<b>Caprin</b>	<b>Bovin</b>	<b>Camelin</b>	<b>Equin</b>	<b>Total</b>
<b>Effectifs</b>						
Effectif national	19 615 730	3 754 590	1 607 890	286 670	238 870	25 503 750
Effectif de la zone steppique	9 413 342	1 162 375	171 237	22 065	35 242	10 804 261
Pourcentage de la steppe(%)	48%	31%	10,60%	7,70%	14,80%	42,40%

MADR [36]

### 1.9. Occupation des terres et ressources fourragères

Selon le HCDS [46], les 20 millions d'hectares de parcours steppiques se répartissent ainsi 15 millions d'hectares de parcours palatables de bon état à dégradés, et 5 millions d'hectares sont occupé par des cultures et autres (tableau 1.2).

Tableau 1.2 : Répartition des parcours steppiques en 2005 [46,41]

Etat des parcours	Superficie (millions d'ha)	(%)	Production (UF/ha)
Dégradés	6,5	43,3	30
Moyennement dégradés	5,5	26,7	70
Bons	3	20	120
Total	15	100	220

L'estimation du potentiel fourrager de la steppe en l'absence d'études fiables et globales reste problématique. Différentes approches ont été tentées et ont abouti aux estimations suivantes :

- ✓ L'approche bibliographique qui permet d'estimer la production fourragère annuelle à l'hectare en fonction de l'état des parcours et des formations végétales dominantes aboutit à une estimation de l'ordre de 3 milliards d'UF [51].

### 1.10. Etat de la steppe Algérienne

Selon BENSOUIAH [52], en Algérie, la dégradation des zones steppiques se manifeste avec gravité. C'est là où les ressources pastorales constituent la principale source de revenu pour les habitants. Les steppes algériennes ont été soumises à une dégradation croissante qui touche essentiellement la ressource « parcours ». Conséquence, la superficie des parcours steppiques dégradés ou en voie de dégradation ne cesse d'augmenter.

La dégradation des parcours est issue de l'interaction de deux types de facteurs. Des facteurs naturels liés aux conditions du milieu physique en général, et



des facteurs socio-économiques anthropiques qui favorisent une action souvent une intervention anarchique de l'homme sur l'écosystème.

D'après SLIMANI et HIRECHE [53], depuis moins de trois décennies de grandes étendues steppiques ont subi une transformation dramatique ; les steppes de l'oued ont régressée de plus de 60% entre 1978 et 2005 ; cette dégradation a touché essentiellement les steppes à Armoise blanche (*Artemisia herba alba*), les « mers» d'alfa (*Stipa tenacissima*) et les steppes à sparte (*Lygeum spartum*).

La productivité des milieux a régressé de 80% en moins de 40 ans ; ce qui peut signifier un sens de dégradation irréversible. Il en est de même pour les autre régions, les steppes du centre ont régressée de 54% en l'espace de 13 ans seulement (1976-1989).

La dégradation des ressources biologiques va avoir un effet direct sur le changement des milieux physiques (destruction des facteurs physiques et chimiques des sols, ensablement, nappes phréatique, tempêtes de sable) et socio-économiques (manque de nourriture pour le cheptel, chômage,...) [50].

Selon NEDJRAOUI [38], la dégradation s'exprime d'une part, par une régression du couvert végétal et des potentialités pastorales des parcours et d'autre part, par l'apparition de placages sableux et de formations dunaires

#### 1.10.1. Les facteurs de dégradation des écosystèmes steppiques

Face à l'accroissement de la population humaine et animale sur un espace vital de plus en plus réduit, on assiste actuellement à une surexploitation de ce qui reste des parcours steppiques. La dégradation des parcours est issue de l'interaction de deux types de facteurs ; des facteurs naturels liés aux conditions du milieu physique en général, et des facteurs anthropiques.

##### 1.10.1.1. Les facteurs naturels

Les facteurs naturels qui sont à l'origine de la dégradation des parcours steppiques sont intimement liés à la fragilité de l'écosystème de ces zones. L'action combinée des facteurs climatiques et les facteurs édaphiques liés à la structure et

à la texture des sols font que les parcours sont soumis à une dégradation irréversible accentuée par le phénomène de l'érosion [16].

- La Sécheresse :

Les steppes algériennes sont marquées par une grande variabilité interannuelle des précipitations. En outre, les dernières décennies ont connu une diminution notable de la pluviosité annuelle, avec parfois plusieurs années consécutives de sécheresse persistante. La diminution des précipitations et la saison sèche a augmenté de mois durant le siècle dernier [54].

La diminution notable de la pluviosité annuelle a accéléré le phénomène de l'érosion éolienne. Dans un milieu ouvert où la végétation a un recouvrement inférieur à 30%, l'action du vent opère un tri en emportant les fines particules telles que le limons et les argiles et laisse sur place des sols squelettiques à dominance d'éléments grossiers présentant un faible pouvoir de rétention d'eau, qui ne peut favoriser la remontée biologique [39].

- Erosion éolienne

L'action de l'érosion par le vent accentue le processus de désertification, elle varie en fonction du couvert végétale. Ce type d'érosion provoque une perte de sol de 100 à 250 tonnes/ha/an dans les steppes défrichées [16].

- Erosion hydrique

Selon LE HOUEROU [16], l'érosion hydrique est due en grande partie aux pluies torrentielles qui, sous forme d'orages violents désagrègent les sols peu épais, diminuent leur perméabilité et leur fertilité. Les éléments fins, l'humus et les éléments minéraux sont emportés par le ruissellement qui provoque la formation de rigoles et de ravines entaillant profondément la surface du sol. Comme conséquence directe de ce phénomène d'érosion, un volume de 50 à 250 tonnes par hectare et par an de terre sont ainsi entraînées par le ruissellement sur les sols dénudés à forte pente.

- Problème de salinité des sols

Plus de 95% des sols des régions arides sont soit calcaires, gypseux ou sal sodiques [42]. Du fait des hautes températures qui sévissent pendant une longue période de l'année, les précipitations subissent après leur infiltration, une forte

évaporation entraînant la remontée vers la surface du sol, des particules dissoutes qui se concentrent en croûtes et stérilisent le sol.

Deux types de dépressions salées aux niveaux des régions arides et semi-arides dont les termes vernaculaires sont Chott et Sebkhah sont présentes [55] ; La différence entre ces deux noms réside dans le mode d'alimentation.

Les sebkhas sont sous la dépendance d'apport des eaux de crues et les Chotts sont alimentés respectivement par les apports de ruissellement et aussi par les nappes artésiennes profondes arrivant jusqu'en surface par des sources et/ou des suintements.

Les Chotts seraient de véritables « machines évaporatoires », en période pluvieuse normale (hiver, printemps) une couche d'eau de quelques centimètres, saturée en sel (300-400g/l) recouvre la surface, laissant après évaporation des dépôts surtout de chlorure de sodium, parfois exploitables. Les chotts peuvent constituer de véritables lacs de plusieurs mètres de profondeur quelques mois après, l'évaporation très forte assèche complètement la surface.

Le vent balayant cette surface desséchée et dénudée peut, dans certaines conditions, entraîner des particules argileuses et des cristaux de sels (chlorure de sodium, gypse) qui s'accumulent en bordure de la dépression [56]. Tout autour de ces systèmes, la présence d'une nappe phréatique plus ou moins salée et inégalement profonde contribue à la formation de sols halomorphes [57].

#### 1.10.1.2. Les facteurs anthropiques (humains)

LE HOUEROU [58], affirme que l'équilibre des écosystèmes naturels a été fortement perturbé au cours des récentes décennies dans la plupart des régions arides et semi-arides sous l'effet de la modification des systèmes d'exploitation du milieu liée à la transformation des conditions socio-économiques et à l'évolution des techniques de production.

En effet, suite à l'accroissement démographique et à la sédentarisation d'une partie croissante de la population, on assiste à une extension rapide à l'agriculture au détriment des meilleures zones pastorales dont la végétation

naturelle est détruite par des moyens mécaniques de plus en plus puissantes. Cette destruction est également aggravée par l'accroissement de la pression animale sur les surfaces pastorales de plus en plus réduites et par le prélèvement des produits ligneux destinés à la satisfaction des besoins en combustibles [59]. Ces différents phénomènes ont contribué à accroître la fragilité des écosystèmes, à réduire leur capacité de régénération et à diminuer leur potentiel de production.

- L'accroissement du cheptel

A l'image de la croissance démographique, la croissance du cheptel ovin dans les zones steppiques a aussi sa part de responsabilité dans la dégradation des parcours. Le cheptel en surnombre détruit le couvert végétal protecteur tout en rendant, par le piétinement les surfaces du sol pulvérulente et tassant celui-ci, ce qui réduit la perméabilité donc ses réserves en eau et augmente le ruissèlement [47].

- La croissance démographique

La croissance démographique semble être parmi les principales causes de la dégradation des parcours steppiques. La population vivante dans ces zones a évolué à un rythme considérable selon les recensements général des habitants.

Selon ONS [61], la croissance démographique dans les régions steppiques a augmenté de 925.708 habitants en 1954, pour qu'elle arrive à plus de 7 millions d'habitants en 1999.

Durant la période (1968-1996), la population nomade a régressé de 540.000 à 200.000 personnes. Cette régression est due au fait que la transhumance diminue au profit de déplacement de très courte durée. En effet, la forte concentration de population a conduit principalement au surpâturage et au défrichement.

La diminution de la population vivante en zones éparses et la baisse de la population nomade traduisent l'importance de la sédentarisation qu'a vécue la steppe ces dernières années. En effets, la sédentarisation est le résultat ultime d'un développement du processus de dégradation de la société pastorale [60].

- Le surpâturage

Pour subvenir à leur besoin et face aux conditions de la vie très sévère, les populations ne trouvent guère autres possibilités que de faire de l'élevage. Les parcours sont utilisés par un nombre d'animaux largement supérieur à celui qu'ils peuvent réellement supporter.

Cette sur exploitation est aggravé par l'utilisation des moyens de transport puissants et rapides qui permettent la concentration d'effectifs importants du cheptel au niveau des zones fraîchement arrosée sans laisser pour cela le temps nécessaire à la végétation de se développer (piétinements, surcharge....).

- Le défrichement et extension de la céréaliculture

Au cours des années 70, l'extension de la céréaliculture fut caractérisée par la généralisation de l'utilisation du tracteur à disques pour le labour des sols à texture grossière fragile. Les labours par ces derniers constituent en un simple grattage de la couche superficielle accompagné de la destruction quasi-totale des espèces pérennes. Ces techniques de labour ont aussi une action érosive, détruisant l'horizon superficiel et stérilisant le sol, le plus souvent de manière irréversible [37].

### 1.11. Présentation de quelques plantes steppiques

Nous avons jugé utile de présenter les particularités de 3 plantes steppiques dominantes dans notre zone d'étude, à savoir : *Retama raetam*, *Aristida pungens* et *Astragalus armatus*.

#### 1.11.1 *Retama raetam* (Forssk)

Les rétames (Fabacée) sont des plantes pérennes, des arbustes monoïques, pouvant atteindre jusqu'à 3 mètres de long [62, 63]. Le système racinaire est de type pivotant pouvant atteindre plusieurs mètres de profondeur. Des racines adventives sont également présentes sur les rameaux et colonisent la surface des dunes, se multiplient au printemps par semis, dans des sols pauvres, bien drainés même sablonneux à forte salinité [64].

En Algérie les rétames occupent une surface considérable du nord vers le sud [64]. Elle est localisée dans le sud oranais, sud de Djelfa, Ain Safra, Touggourt, au centre de la Kabylie, à l'est de Biskra [65], également à Ouargla [66].

L'espèce *Retama raetam* est un arbuste saharien de 1 à 3,5 m de la famille des fabacées [67]. Arbuste très ramifié avec des rameaux en forme de balai (figure 1.2), les jeunes velus. Feuilles éphémères, linéaires et soyeuses. Fleurs en grappes de 2-10 ; calice marron qui tombe à la floraison, corolle papillonacée, blanche. Fruit en gousse monosperme, ellipsoïde, avec un mucron apical court. Espèce endémique de Sicile méridionale de la province de Caltanissetta. Il s'agit d'une plante psammophile typique des dunes [68].

Selon CHEHMA [69], *Retama raetam* se trouve en pieds isolés ou colonisant de très grandes surfaces dans les dépressions, les lits d'oued et les zones sableuses, il est commun dans tout le Sahara septentrional.

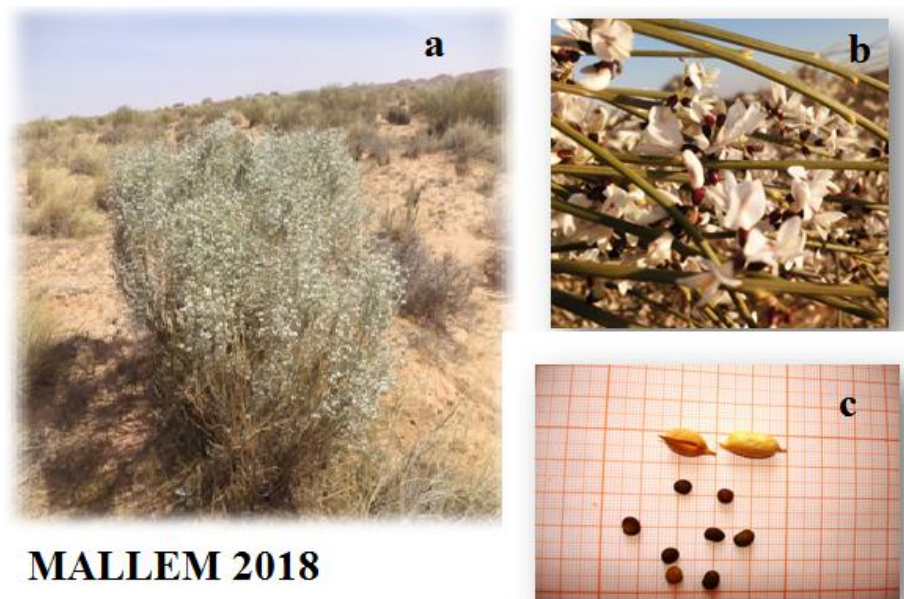


Figure 1.2 : *Retama raetam* ( a : vue générale, b : fleur, c : graines et fruits )

Le genre *Retama* regroupe des espèces très intéressantes, du point de vu biochimique, moléculaire et écologique.

Selon MITTLER [70], *Retama raetam* s'adapte bien aux conditions les plus extrêmes, les rétames sont des espèces fixatrices de dunes grâce à leur système racinaire très développé.

Le genre *Retama* occupe une place considérable dans la flore ligneuse des dunes côtière et des dunes du désert. Grâce à son potentiel fixateur d'azote, cette légumineuse arborescente joue un rôle écologique important dans la formation des îles de fertilité "island of fertility" où peuvent se développer plusieurs espèces annuelles et d'autres espèces ligneuses [71]. Son expansion dans les zones arides et semi-arides, est due à son adaptation aux conditions environnementales difficiles qui caractérisent l'habitat de dune, comme la rareté de l'eau et les nutriments, En effet une étude récente a confirmé que le genre *Retama* peut tolérer une salinité relativement élevée [72]. Par ailleurs, grâce à son système racinaire important, pouvant atteindre une vingtaine de mètres [73]. Ce genre joue un rôle considérable dans la stabilisation des sables dunaires mobiles, soulève à la fois l'humidité et la disponibilité de l'azote organique [74]. Les espèces du genre *Retama* présentent de nombreuses vertus thérapeutiques, grâce aux alcaloïdes et aux flavonoïdes qu'elles renferment dans ces organes. En outre, Maghrani et al. [75], a démontré une activité hypoglycémique pour cette plante. De plus un effet antioxydant [76] et une activité anti-inflammatoire [77],

STOKER [64], a démontré que les graines de cette plante présentaient une dormance tégumentaire qui pourrait être levée par le trempage dans l'acide sulfurique.

#### 1.11.2. *Aristida pungens* L. (1753)

Selon POILICOT [78], le synonyme de *Aristida pungens* Desf., est *Stipagrostis pungens* (Desf.). QUEZEL et SANTA [67], notent que le nom arabe attribué à *Aristida pungens* Desf., est « drinn » ; « Rachig » ; « Sbott » en Lybie et Toulloultou aghifouf au Maroc. En anglais c'est le three-awn grass.

*Aristida pungens*, est une graminée à rhizome traçant, à longues feuilles enroulées sur elles-mêmes et pointues à l'extrémité, bien reconnaissable en outre aux arêtes de ses glumelles qui comportent trois branches plumeuses [63].

POILICOT [78], décrit la plante comme étant une Herbe pérenne, à longs rhizomes obliques. L'*Aristida pungens* est une plante vivace très robuste, dépassant 1 mètre de haut, leurs feuilles très rigides raides (figure 1.3), fines et piquantes à l'extrémité, enroulées en long et partant tous d'une souche souterraine. Très important réseau racinaire, pouvant parcourir plusieurs mètres en superficie, l'inflorescence composée de petits épis secondaire ou épillets, il est présent partout au Sahara, où il y a présence de surfaces ensablées, le plus souvent elle constitue de vastes steppes homogènes.

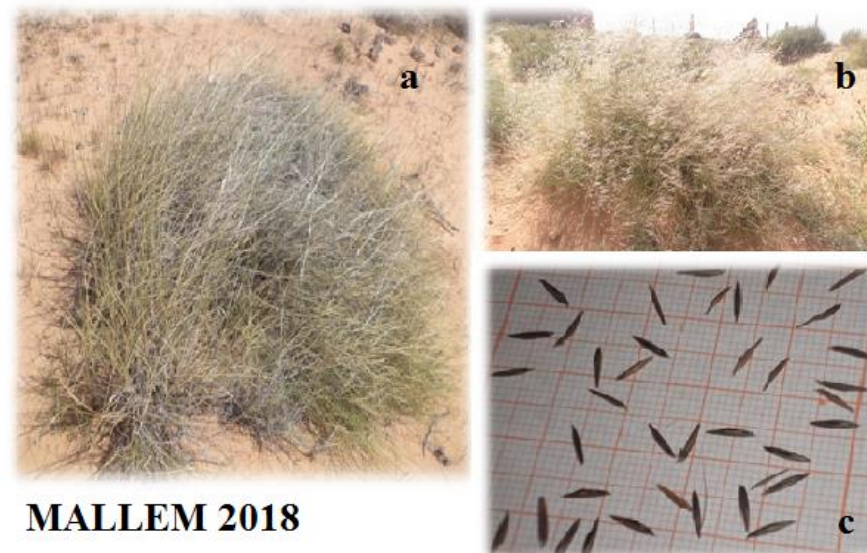


Figure 1.3 : *Aristida pungens* L.( a : vue générale, b : floraison., c : graines)

Elle peut résister à 4-5 ans de sécheresse. La vie végétale de 'Drinn' dure toute l'année et la plante est toujours verte. Elle est caractérisée par deux périodes de vie : une vie ralentie (Août à Mars) et une vie active (Avril à Juillet), l'épiaison ce fait en avril-mai [78].

L'*Aristida pungens* L. est utilisée comme brise-vent à immobiliser les dunes, constitue le pâturage de base pour le dromadaire, dans les zones sahariennes, les éleveurs distribuent le 'Drinn' comme aliment grossier à toutes les catégories d'animaux d'élevage. Elle est également riche en hemicellulose et très intéressantes pour l'industrie papetière. La partie aérienne d'*Aristida pungens* L. est



utilisée par macération et tisane contre la constipation, les maux d'estomac et les indigestions. Sa décoction est bue contre les douleurs rhumatismales [79].

### 1.11.3. *Astragalus armatus* Willd

*Astragalus armatus* Willd. (Fabaceae) localement connu comme " ketad" est une espèce endémique en Algérie. Le genre *Astragalus* se compose de 3000 espèces dans le monde [63]. En Algérie, le genre *Astragalus* est distribué dans la zone présaharienne et est associée à la désertification dans les zones arides en raison du surpâturage.

Cette plante vivace très épineuse (figure 1.4) à tiges ligneuses dressées, ne dépasse guère 60 cm de hauteur. Feuilles pétiolées, imparipennées, composées de folioles étroites d'un vert foncé. Fleurs médiocres axillaires. La floraison a lieu à la fin de l'hiver et se poursuit jusqu'à la fin du printemps. Chez cette espèce l'importance de la reproduction est constatée : un individu adulte peut former jusqu'à 1500 fleurs [80].



Figure 1.4 : *Astragalus armatus* ( a : vue générale, b : fleur, c : graines)

*L'Astragalus armatus* est une plante à feuilles composées pennées et dont les folioles tombent et le rachis devient épineux : dans ce cas, il ne s'agit pas d'une

modification saisonnière mais définitive. En plus en été, on observe un arrêt de la végétation avec une chute totale des folioles [80].

Ce taxon présente quelques particularités éco physiologiques qui favorisent sa prolifération rapide sur la steppe :-bonnes aptitudes germinatives en milieu naturel, puissance de son enracinement apte à valoriser les faibles réserves hydriques du sol, L'importance de la phytomasse peu palatable produite [81]. C'est une plante fixatrice d'azote atmosphérique [82].

Selon CHAIEB [81], Toutefois, bien qu' *Astragalus armatus* soit considérée comme étant une espèce marquant la dégradation, elle peut contribuer, ne serait-ce que de façon partielle, au processus de restauration de l'équilibre écologique dans ces milieux dégradés. Le piégeage du sable et la reconstitution du voile éolien par les touffes très développées entraînent une amélioration du bilan hydrique du sol et favorisent la germination d'espèces jusqu' alors raréfiées. Enfin, son aptitude à fixer de l'azote atmosphérique contribue à améliorer la fertilité du sol.

En Tunisie, il est utilisé comme tonique, stimulante et en cas d'anémie, en Algérie, les plantes appartenant au genre sont utilisées en cas de fatigue, la grippe, l'asthme, les douleurs arthritiques et déficience du système immunitaire [83]. Les prétendus bienfaits d'astragale sont un peu vagues, au moins du point de vue scientifique. Astragale prévenir les symptômes de l'allergie et l'asthme, il a été proposé comme une plante médicinale pour tout du sida, syndrome de fatigue chronique, l'hépatite et la myasthénie au cancer [84,85]. D'après MOUSSAOUI et al. [86], *Astragalus armatus* est présenté comme une bonne matière primaire pour la fabrication des papiers.

## CHAPITRE 2

### EROSION EOLIENNE

#### 2.1. Définition de l'érosion éolienne

L'érosion éolienne est un processus qui se produit quand tout ou une partie du sol est déplacé par le vent hors du site où il se trouve, sur une distance variable. Il s'agit d'un processus irréversible. L'érosion éolienne est un phénomène de dégradation du sol usant des vents pour arracher, transporter et déposer des quantités importantes de sédiments [87].

D'après NICKLING [88], l'érosion éolienne se produit essentiellement dans les régions où le vent est suffisamment fort et le sol est nu, sec et émiété. Elle peut être due à certains effets humains exemple le labour, elle se caractérise par la perte du sol ou bien le transport de ses particules [89]. Elle est considérée l'élément majeur qui cause la dégradation du sol [90].

La dégradation des terres est surtout due aux activités humaines dans des zones initialement défavorisées par la nature. C'est en Afrique qu'elle est le plus accentuée [91]. Les terres dégradées à cause de l'érosion éolienne occupent une part considérable dans le total des superficies dégradées en Afrique du nord (tableau 2.1).

Tableau 2.1 : Répartition des superficies affectées par la dégradation des terres en Afrique (M.ha) [92]

	Erosion		Dégradation		Total
	Hydrique	Eolienne	Physique	Chimique	
Afrique	360	510	4	9	1000

Dans les milieux fragiles, l'érosion éolienne des sols est un des principaux facteurs de leur dégradation, elle perturbe profondément ses fonctions. L'érosion éolienne provoque un tri sélectif des matériaux déplacés en entraînant préférentiellement les particules les plus fines du sol. Ce processus affecte à la fois les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques des sols [12].

Dans les régions arides, l'érosion éolienne constitue un facteur majeur qui contribue à la dégradation des terres dans ces milieux fragiles [89, 93]. Dans les zones subsahariennes l'aridification et la dégradation de l'environnement se sont traduites, par un accroissement graduel de concentration en poussières dans l'atmosphère au cours de ces dernières décennies, ces constats sont la preuve de la dégradation des terres par érosion éolienne dans ces zones [94]

## 2.2. Les processus de l'érosion éolienne

Le phénomène d'érosion éolienne requiert l'application d'une force mécanique (exercée par le vent) supérieure aux forces de résistance du sol. Il a pour conséquence le détachement, le transport et le dépôt de sédiments. Ces mécanismes dépendent de la taille (figure 2.1) des particules et des interactions entre la vitesse du vent [95].

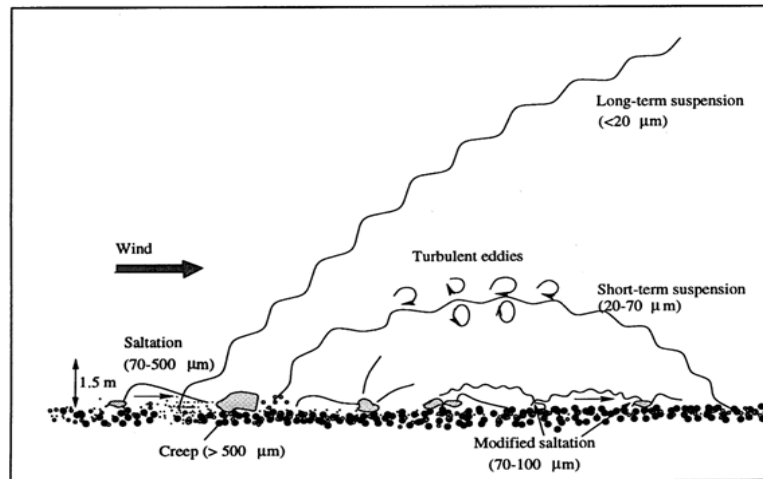


Figure 2.1 : Illustration des modes de transport pendant un évènement érosif : la saltation, la reptation (creep), et de la suspension [96].

La saltation est le mode de transport des particules ou des agrégats de particules dont le diamètre varie de 0.1 à 0.5 mm [97] et de 0.5 à 1.1 mm [98]. La particularité de la saltation est que les particules ou agrégats de particules se déplacent par bonds successifs. Lorsqu'ils retombent, leur impact contribue au détachement d'autres particules. Selon l'USDA-NRCS [97], 50 à 80% des particules et/ou agrégats de particules sont transportées par saltation. La suspension est le mode de transport des particules qui ont un diamètre inférieur à 0.1 mm. Elles sont généralement mises à la disposition du vent par l'effet de la saltation. Elles peuvent rester longtemps dans l'atmosphère et voyager sur de très longues distances, de 20 à plus de 60% des particules érodées sont transportées par suspension.

La reptation (creep) est le mode de déplacement des particules et/ou des agrégats de particules dont la masse empêche leur soulèvement par le vent. Leur mouvement est souvent provoqué par l'effet des particules en saltation. La proportion de particules transportées par reptation peut varier de 7 à 25% [99,97].

### 2.3. Facteurs influençant l'érosion éolienne

FRYREAR [100], considère le contenu en eau, la rugosité, l'érodibilité (prédisposition à l'érosion), la quantité et l'orientation des résidus de culture, ainsi que le système d'exploitation comme les facteurs déterminant la vulnérabilité d'un sol à l'érosion éolienne (tableau 2.2).

Tableau 2.2 : Facteurs clés influençant l'érosion éolienne dans un contexte sahélien

Climat	Sol	Végétation	Morphologie	Activités humaines
Vitesse du vent (+)				Surexploitation agricole (+)
	Texture (±)	Type (±)	Rugosité de surface (±)	Surpâturage (+)
Turbulence (+)	Stabilité de la structure du sol (-)	Couverture dense (-)	Pente (±)	Reboisement (-)
Précipitation (-)	Matière organique (-)		Billons (±)	Résidus de culture (-)
Évaporation (+)	Calcium Carbonate (±)			
Température de l'air (+)	Densité des agrégats (±)			
Pression de l'air (+)	Agrégation du sol (-)			
	Eau contenue dans le sol (-)			

:Shi et al. [101].

A noter : (+), (-) et (±) signifient que l'érosion éolienne devient forte, faible et incertaine à mesure que le facteur prend de l'importance.

### 2.3.1. Facteurs d'érosivité

Le facteur d'érosivité correspond aux risques érosifs potentiels dans une région donnée. Il est directement fonction des paramètres du vent : sa vitesse, sa durée, son intensité et ses variations spatiotemporelles [102].

Ce facteur est indirectement fonction des autres paramètres climatiques tels que la pluie, la rosée, le brouillard. Ceux-ci, par leur action humidifiantes, ils favorisent la cohésion du sol et augmentent la croissance végétale, ce qui a pour effet de réduire la vitesse du vent au sol et donc son érosivité [101].

La température de l'air, couplée aux précipitations, définit l'évaporation qui a un impact sur l'humidité des sols. Cette dernière est responsable de la cohésion du sol, notamment des sables et ses limons, et atténue l'érosion éolienne [101].

### 2.3.2. Facteurs d'érodibilité

Le sol est composé de particules de forme, de densité et de taille différentes. Celles-ci sont liées entre elles pour donner une structure plus ou moins stable qui va déterminer l'érodibilité du sol [102]. Les principaux facteurs qui l'influencent sont les suivants :

#### 2.3.2.1 L'état de surface

Selon ROGNON et al. *in* HOUYOU [102], l'érodibilité est influencée par l'état de la surface du sol. La rugosité de surface peut ralentir la vitesse du vent au niveau du sol et ainsi réduire sa capacité de mobilisation. En contrepartie, elle peut transformer un écoulement laminaire en écoulement turbulent, accentuant ainsi la force d'arrachement des particules et donc l'érosivité du vent.

La présence d'une pellicule de battance ou de pierres amoindrit la possibilité de l'érosion éolienne. Si le ratio entre la couverture caillouteuse et la surface est supérieur à 0.1, l'érosion éolienne est fortement diminuée [95].

La vitesse du vent peut être influencée par la pente du terrain ainsi que le méso- et macro-relief. Ainsi la longueur et l'orientation des parcelles agricoles (et

d'éventuels billons) par rapport aux vents dominants ont des répercussions sur l'érodibilité des sols [102].

La présence de sels peut cependant augmenter la fraction d'agrégat et ainsi contribuer à la stabilité du sol. Les croûtes superficielles sont une couche dense à la surface du sol qui réduit en partie l'érosion éolienne. Une fois que la croûte superficielle d'origine physique ou biologique est dégradée, les particules auront tendance à atténuer puis à briser par saltation la cohérence des agrégats maintenus en place [102].

#### 2.3.2.2 La texture

Des teneurs élevées en argile et en limon ont pour effet une plus grande cohésion au sol par la formation d'agrégats agissants comme agent liant [103]. En contrepartie, des sols limono-sableux (10-100  $\mu\text{m}$ ) n'ont qu'une faible cohésion [104]. De plus, tous les agrégats ou particules qui ont une taille inférieure à 840  $\mu\text{m}$  sont considérés comme érodibles [105].

#### 2.3.2.3 La structure des sols

Un contenu élevé en matière organique favorise la formation d'agrégat [106,107]. Du point de vue physique, la matière organique structure le sol, le stabilise, amoindrit la compaction et favorise la rétention d'eau [108]. Au niveau chimique, elle accroît la capacité d'échange cationique du sol et fournit les plantes en éléments nutritifs [109]. OADES [110] a démontré le rôle prédominant de cette substance dans des sols dépourvus de calcaire ou avec un contenu réduit en oxydes de fer et aluminium, le calcaire, source d'ion  $\text{Ca}^{2+}$ , permet également de lier les particules entre elles ce qui a un effet positif sur la stabilité. Les oxydes de fer et d'aluminium, quant à eux jouent un rôle de flocculant au sein du sol.

#### 2.3.2.4 La teneur en eau

La teneur en eau tend à lier les particules entre elles et donc à augmenter la cohésion du sol, les rendant indisponibles pour le transport éolien. Dans le cas des sables, l'eau dans la couche superficielle est facilement évacuée facilitant ainsi la rupture des forces de cohésion [111]. CHEPIL [112] a montré que l'érodibilité d'un



sol diminuait en fonction du carré de l'augmentation de la teneur en eau. Les valeurs limites pour lesquelles le transport a lieu varient de 4 % à 1,8% de teneur en eau massique [113].

#### 2.3.2.5 La végétation photo-synthétiquement active

Un couvert végétale dense enraye l'effet d'avalanche causé par la saltation et constitue un obstacle au vent ce qui réduit sa vitesse ainsi que sa force de déflation [89]. Les racines des végétaux fixent les particules de la terre en place, permettent l'accumulation de la matière organiques, améliorent la structure (agrégation et stabilisation) du sol et maintiennent la cohésion de la couche superficielle du sol [114]. En conséquent, la perte de la végétation naturelle et les

pratiques agro-sylvo-pastorales inadaptées (défrichement important, déforestation abusive, surpâturage) augmentent considérablement l'érodibilité d'un sol [102].

#### 2.3.2.6 Les activités humaines

Les méthodes d'exploitation déterminent en partie la vulnérabilité à l'érosion. En effet, MIDDLETON [115] a démontré que la surexploitation de terres agricoles, le surpâturage, les feux de brousse, la déforestation, la salinisation et l'absence de fumier sur les champs pouvaient initier ou accroître la dynamique de l'érosion. D'autre part, des résidus de culture laissés en surface permettent la restitution d'éléments minéraux, améliorent la structure du sol, augmentent sa teneur en matières organiques, favorisent l'infiltration de l'eau et influencent positivement l'évaporation, sa température du sol et la fixation de CO<sub>2</sub> dans le sol [116]. Des résidus de culture fichés dans le sol peuvent ralentir la vitesse du vent et s'opposer à la mobilisation des particules de sols.

### 2.4. Conséquences de l'érosion éolienne

Les conséquences de l'érosion éolienne sont nombreuses et les échelles sur lesquelles il faut les considérer vont de la simple plantule aux changements climatiques globaux en passant par la santé humaine [102].

### 2.4.1. Conséquences sur les champs et le sol

Le transport de sable par l'érosion éolienne affecte directement les plantes par abrasion, elles peuvent être lacérées par les particules de sol et retardées dans leur croissance entraînant ainsi une baisse de rendement, de qualité et de valeur marchande [117].

Une accumulation de sable ensevelit la plantule la privant de ressources, et peut engendrer sa mort. En opposition, une déflation importante déchausse la plante et expose ses racines ce qui accentue la perte en eau et nuit à la croissance de la plante [89].

Enfin, les sédiments emportés par le vent sont généralement plus fertiles que le matériau parental car, dans un premier temps, seul les particules fines à contenu élevé en nutriments sont mises en mouvement [118]. Ceci a pour effet l'augmentation de la fraction de particules grossières et la diminution de la proportion de matière organique ce qui produit une couche superficielle de moins bonne structure, une baisse de la capacité de rétention de l'eau et une vulnérabilité à encroûtement rapide en cas de fortes pluies [119].

Selon la nature de l'obstacle les sables s'accumulent pour donner naissance -à différentes formations qui ont été décrites par POUGET [55] comme suit :

- Voiles sableux : C'est un recouvrement généralement discontinu peu épais, dont la hauteur et la longueur sont de quelques centimètres, il est plus ou moins fixé par une végétation psammophyte (figure 2.2).
- Nebkas : Ce sont des formations sableuses de tailles variables de quelques centimètres à quelques décimètres de haut pour une longueur de 0,5 à 2 mètres.
- Micros dunes : Généralement plus importantes que les Nebkas, les accumulations de sables sont plus ou moins fixées par des touffes de psammophytes spécifiques vivaces qui donnent une certaine stabilité en épaisseur à la masse sableuse. -

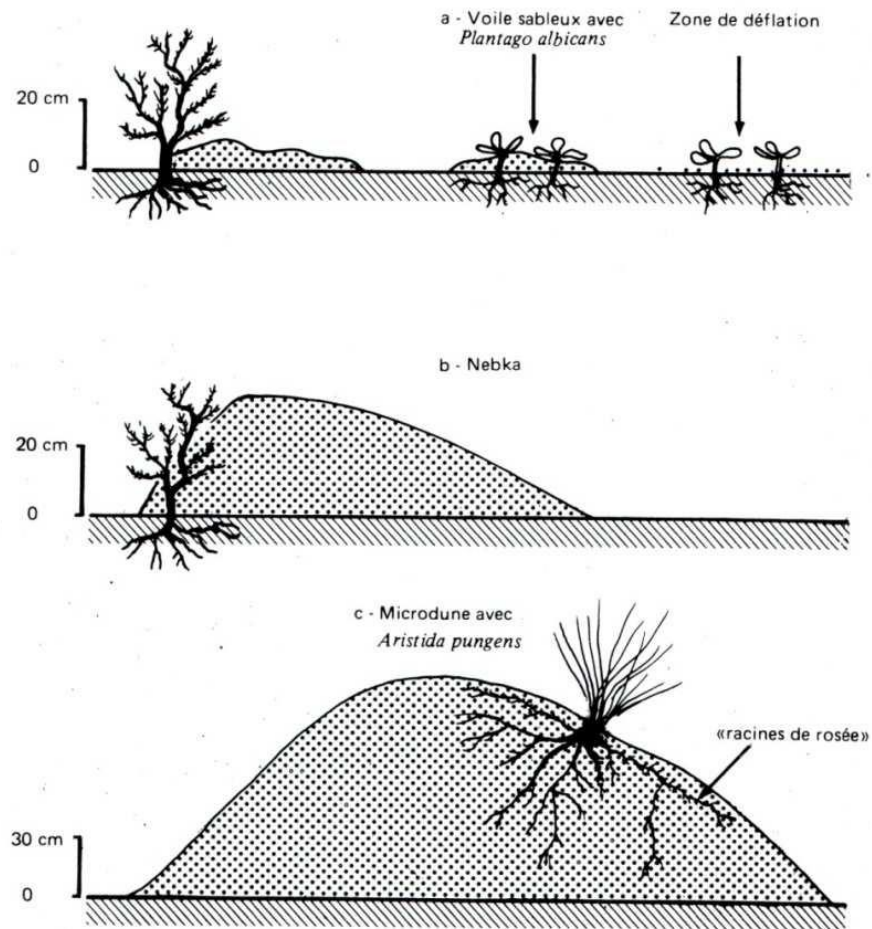


Figure 2.2 : Principales formations éoliennes mobiles [55]

#### 2.4.2. Conséquences sur la santé

Le Sahara et le Sahel sont le point de départ de très grandes quantités de particules fines dont environ la moitié, ont un diamètre inférieur à  $2,5 \mu\text{m}$  [120]. Ces dernières peuvent avoir un effet néfaste sur la santé humaine car elles pénètrent facilement dans le système respiratoire et se déposent ensuite dans les poumons [121]. Un taux élevé de particules est corrélé à une augmentation du taux de mortalité et des problèmes respiratoires, tels que l'asthme et les bronchites chroniques [122].

#### 2.5. Lutttes contre l'érosion éolienne

La lutte contre l'érosion éolienne s'organise à deux niveaux. Il faut d'une part réduire la vitesse du vent à la surface du sol, et d'autre part augmenter la

cohésion du matériau face à cette agression. Les méthodes de protection utilisées et les normes établies varient selon l'expérience propre de chaque pays, selon les particularités du périmètre traité, la nature et la disponibilité en matériaux locaux naturels ou artificiels, mais aussi selon la stratégie politico-économique établie en fonction des objectifs recherchés [123].

L'apport de matières organiques dans les horizons superficiels du sol améliore sa structure. Il est également possible d'augmenter la rugosité de la surface du sol via des techniques culturales de labour appropriées. Laissant à la surface du sol de grosses mottes ou des billons perpendiculaires à la direction dominante des vents. Ces billons ne doivent pas dépasser 40 cm de haut, sans quoi le vent décoiffe leur sommet et accélère l'érosion. Une autre technique, le mulching, consiste à couvrir le sable d'objets (naturels ou artificiels) pour former une couche protectrice afin de supprimer la prise en charge éolienne au niveau du sol et d'empêcher le mécanisme de saltation. La pulvérisation de déchets pétroliers, d'huile lourde ou de bitume et de déchets de l'industrie plastique (genre de colle diluée) permet d'agglomérer les particules à la surface du sol et donc de les rendre difficilement transportables par le vent [124].

Là où on dispose d'eau, l'irrigation d'appoint peut être une méthode efficace et rentable pour réduire les problèmes d'érosion. Il suffit en effet d'irriguer le sol avant la saison des pluies normales pour permettre le labour dans de bonnes conditions et l'installation d'un couvert végétal avant les tornades qui, généralement, causent des dégâts au début de la saison des pluies. La vitesse du vent peut être réduite en augmentant la densité du couvert végétal. Ceci est évidemment difficile en milieu aride. Il est donc particulièrement important de veiller à une saine gestion des résidus de culture qu'il faut tenter de maintenir à la surface du sol de façon à augmenter la rugosité du terrain, et de protéger la surface du sol [123].

Dans les zones soumises à des vents violents, l'installation de haies vives et de brise-vent sont des méthodes bien connues. Le brise-vent est un obstacle qui diminue la vitesse du vent, engendre une réduction de la capacité de charge et donc un dépôt à son niveau. Il en résulte une dune artificielle, « dune d'arrêt » [125]. Dès que l'accroissement vertical de l'accumulation sableuse due au brise-vent dépasse la hauteur de celui-ci, le sable n'est plus piégé mais transporté au-delà. D'où la

nécessité d'en ériger un nouveau au-dessus du premier. L'efficacité de cette construction exige qu'elle reste perméable au vent, pour en limiter la vitesse sans favoriser la genèse de tourbillons [124]. La porosité optimale serait de l'ordre de 40 à 50 % et la distance sur laquelle les particules se déposent suite à la diminution du flux va jusque 5 fois en amont et jusque 20 fois la hauteur du brise vent en aval [126].

### 2.5.1. Fixation des dunes de sable

Selon CILSS [127], les dunes sont des collines de sable qui se forment dans des zones où le sable est abondant et non fixé par la végétation (zones de désert, plage,...). Elles se déplacent sous l'action des vents forts qui soufflent.

Le principe de fixation des dunes est d'empêcher au sable de se déplacer pendant un temps suffisamment long pour permettre à la végétation naturelle ou plantée de s'y développer, il existe plusieurs techniques de fixation des dunes dont le plus couramment pratiquées sont :

#### 2.5.1.1. La fixation mécanique des dunes

La fixation mécanique des dunes consiste à freiner le mouvement du sable, en érigeant des palissades de 1 à 1.5 m de hauteur, afin de provoquer une accumulation de sable qui permettra la formation d'une dune artificielle au niveau de ces palissades, ces palissades sont des branches d'arbres de feuilles de palmiers (figure 2.3). Elles peuvent être aussi des nattes de tiges de céréales enfoncées dans la dune, les obstacles doivent être parallèles entre elles et perpendiculaires à la direction du vent, il faut faire alors des palissades croisées [98].

Les palissades doivent être entretenues jusqu'à ce que la végétation soit rétablie, pour aider à la fixation, il y'a possibilité de déposer un léger branchage ou tout autre débris simplement sur le sable pour bien jouer son rôle. La palissade doit être perméable au vent ( 30 à 40 pour cent) , afin de freiner sa vitesse, elle doit former une accumulation de sable sans provoquer un phénomène tourbillon, sa hauteur ne doit pas dépasser 1.5 m car la plupart ( 95 pour cent) du sable en

mouvement se trouve dans les 30 premiers centimètres au-dessus de la surface du sol [127].



Figure 2.3 : Palissade à base de palmes pour fixer le sable , FAO [98]

#### 2.5.1.2. La fixation biologique

L'objectif de cette fixation consiste à mettre en place une strate végétale arborescente et arbustive de part et d'autre des palissades destinées à remplacer rapidement l'effet protecteur provisoire celle-ci, les espèces seront choisies en fonction de leur aptitude au terrain et susceptibles de mieux résister aux déplacement des grains de sables à la sécheresse et posséder une croissance rapide (Espèces arbustives : *Retama raetam*, *Atriplex canescens*, *Aristida pungens*....etc) [127, 128].

Les sols des formations éoliennes appartiennent à la classe des sols minéraux bruts d'apport éoliens très peu fixés, ils sont constitués par un ensemble de matériaux composé d'environ 95% de sable de dimensions comprises entre 20  $\mu\text{m}$  et 2  $\mu\text{m}$  et sont caractérisés par une teneur en éléments fins (argile et limon fin) toujours en faible proportion (<5%) [129].

D'après MAKHLOUFI et al.[130], les éléments minéraux tels que P, K, Mg, Na, Cl, sont présents dans le sol, mais en proportion infime, ce taux est dû à l'instabilité de la structure (apports et départs) et à la faible activité des micro-

organismes, les sols sableux sont filtrants et ont une faible capacité de rétention. Les sols dunaires ont en général une porosité élevée et un bon réservoir d'eau, ces caractéristiques présentent un grand intérêt dans la conduite du choix des espèces à utiliser au niveau des formations éoliennes.

## CHAPITRE 3 MATERIEL ET METHODES

### 3.1. Présentation de la zone d'étude

#### 3.1.1 Situation géographique de la zone d'étude

La zone d'étude (Bled el Hirane ou Mokrane) est une zone de formations sableuses, de forme approximativement triangulaire, elle se situe 5 km à l'ouest de la ville de Laghouat, ces coordonnées de localisation sont 33°48'N et 02°48'E (figure 3.1). Elle est délimitée à l'est par le Djebel Lahmar qui la sépare de la ville. A l'ouest elle est délimitée par la commune de Kheneg et au nord, la zone est limitée par Oued M'Zi (figure 3.2). Mokrane est une zone de transhumance et dans laquelle en 1984 fut implanté sur une superficie d'environ 450 ha un périmètre agricole dans le cadre APFA selon la DSA de Laghouat. La zone est fortement anthropisée, et à fort transit éolien [131,33], dans la zone de Mokrane, différentes activités agricoles sont pratiquées (labours et élevage ovins).

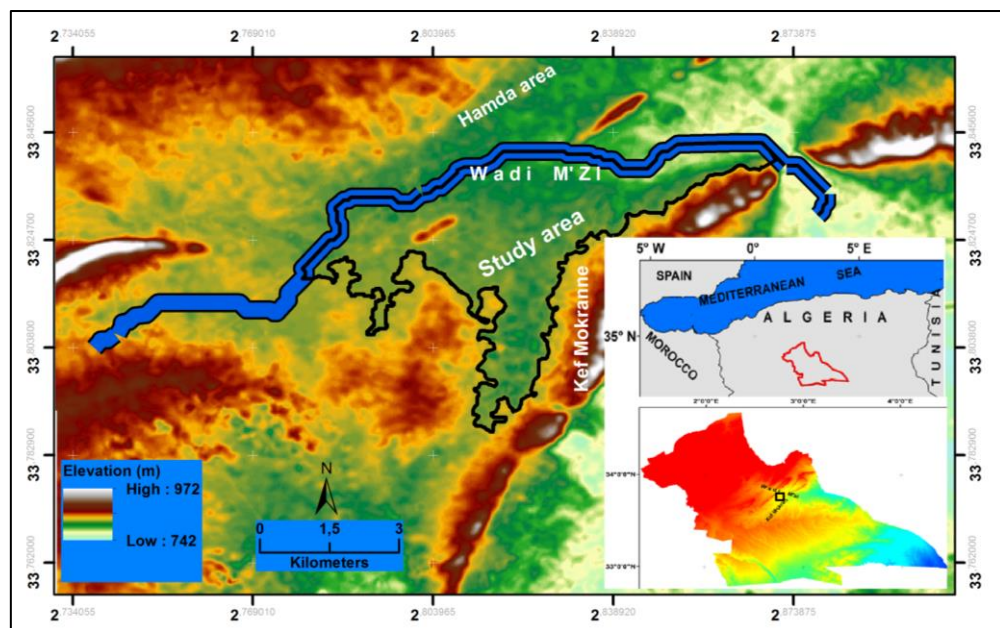


Figure 3.1 : Localisation de la zone de Mokrane dans la wilaya de Laghouat



### 3.1.2. Cadre géologique

Selon IAP [132], la zone de Mokrane est caractérisée par les formations géologiques suivantes (figure 3.2) :

- L'ère tertiaire : Elle est formée surtout par le Crétacé qui couvre la majeure partie de la wilaya.
- L'ère quaternaire : Elle est formée par des dépôts alluviaux et colluviaux récents à anciens, ils occupent quelques dépressions et les terrasses d'oueds.

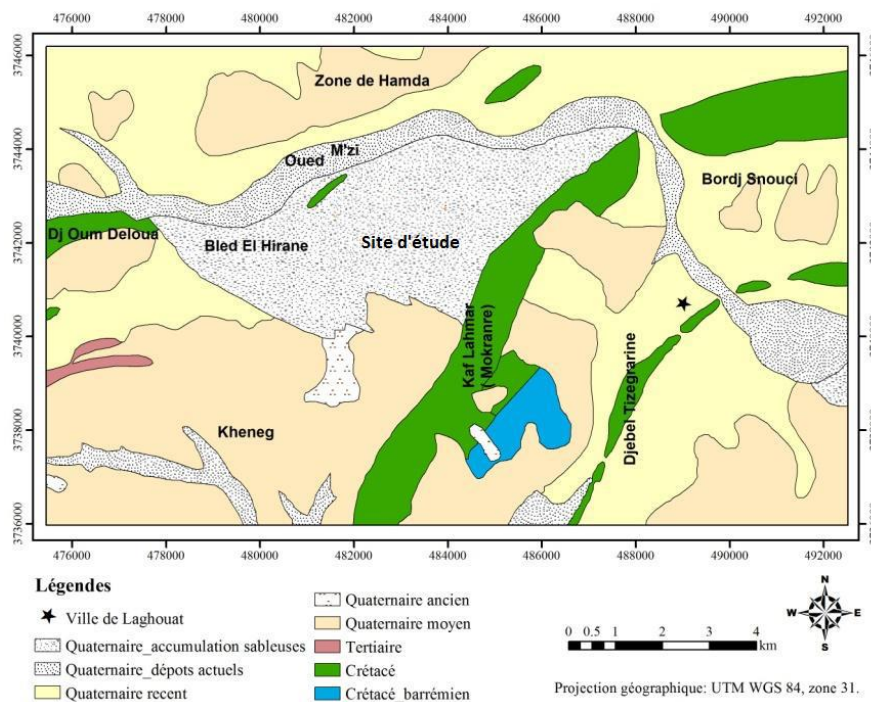


Figure 3.2 : Cadre géologique de la zone d'étude [102]

### 3.1.3 Géomorphologie de la zone d'étude

Les déplacements sur la zone de Mokrane nous ont permis d'identifier visuellement cinq unités géomorphologiques (figure 3.3), nous avons distingué :

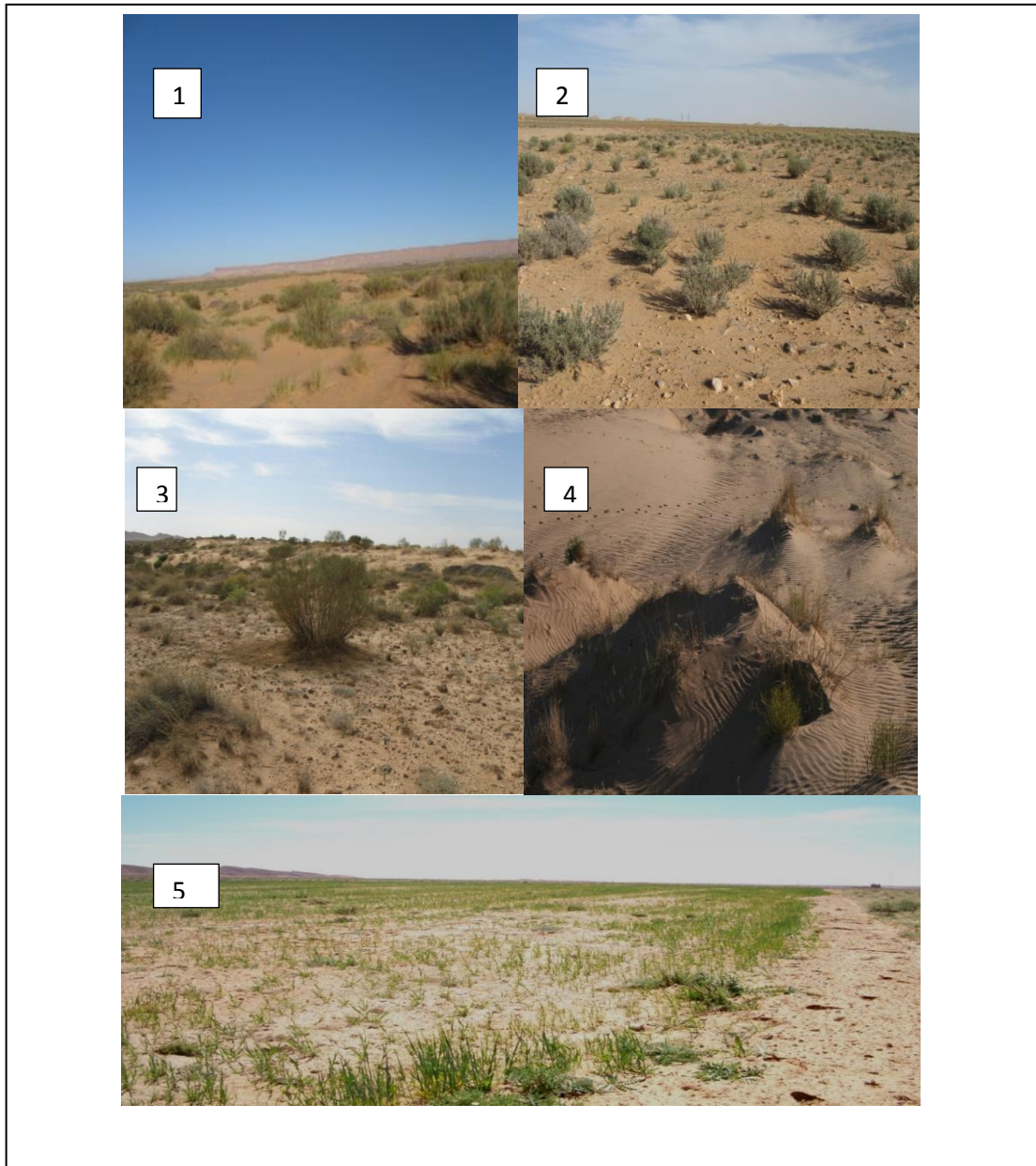


Figure 3.3 : Les différentes unités identifiées sur le terrain :

(1) steppes ensablées, (2) Petits plateaux caillouteux, (3) Petits espaces encroûtés, (4) Dunes peu végétalisées (5) des parcelles cultivées (orge).

--Dunes peu végétalisées : Présentant un aspect de formations dunaires de tailles variables et peu végétalisées. –

- Steppes ensablées : Se présentent comme des petites formations sableuses aplaties supportant une végétation plus diffuse et relativement dense comparées aux dunes peu végétalisées.

- Parcelles cultivées : Ce sont des parcelles défrichées et exploitées par des agriculteurs, pour la mise en place de différentes cultures

-Petits plateaux caillouteux : des espaces qui se présentent avec une charge caillouteuse prépondérante et une végétation épineuse.

- Petits espaces encroûtés : de petits espaces encroûtés interdunaires plats présentant environ un diamètre maximum de 120 m, le sol est généralement compact et présente une croûte superficielle de couleur brune rougeâtre et une charge caillouteuse parsemée à la surface.

### 3.1.4 Cadre climatique

Les données climatiques de la région de Laghouat durant une période de 21 ans ont été enregistrées par ONM [133], les moyennes mensuelles des précipitations, des températures, de l'humidité et du vent sont présentées dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1 : Moyennes mensuelles des données climatiques de la période (1996-2016) de la région de Laghouat [133].

Mois	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Jui	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec
P (mm)	5,46	6,46	11,02	18,2	10,14	9,2	6,06	12,27	25,63	19,67	8,99	18,11
T° (C)	1,96	9,85	13,71	17,04	22,5	28,06	32,22	30,3	25,3	19,7	12,7	9,3
Vent( m/s)	2,97	3,96	3,99	4,67	4,42	4,19	3,66	3,47	3,51	2,87	3,162	2,94
H%	64,3	56,8	44,2	42,3	38,02	34,5	26,8	29,8	44,2	53,3	58,7	61,6

La lecture du tableau 3.1, a révélé que le mois le plus pluvieux a été le mois de septembre avec une pluviométrie de 25.63 mm, par contre le mois le moins pluvieux a été le mois de janvier avec une pluviométrie de 5.46 mm. Le cumul annuel de la pluviométrie au cours de 21 ans a été de 151.21 mm. Dans la région de Laghouat les précipitations ont été irrégulières et très faibles [102].

L'analyse des valeurs du tableau 3.1, a montré que les températures maximales moyennes ont été enregistrées au cours de la période estivale, avec un maximum en juillet, qui a été de 32.22 °C, tandis que les valeurs moyennes de la température minimale ont atteint les faibles valeurs au cours de la période hivernale où le minimum a été enregistré dans le mois de janvier avec une valeur de 1.96°C.

En ce qui concerne l'humidité relative de l'air, le mois le plus humide a été le mois de janvier avec une valeur de 64.33 %, et le mois le plus sec a été le mois de juillet avec 26.8 %.

La vitesse moyenne du vent dans la région de Laghouat durant la période 1996-2016 a été de 3.65 m/s. Le mois qui a enregistré les vents les plus violents a été le mois d'avril avec une valeur de 4,67m/s. Le mois d'octobre a été le mois le moins venteux avec une valeur de 2,87 m/s.

Durant la période de notre étude (2009 -2016), la direction du vent a oscillé entre le Nord- Est et le sud- Ouest, avec une dominance du Nord-Ouest (figure 3.4).

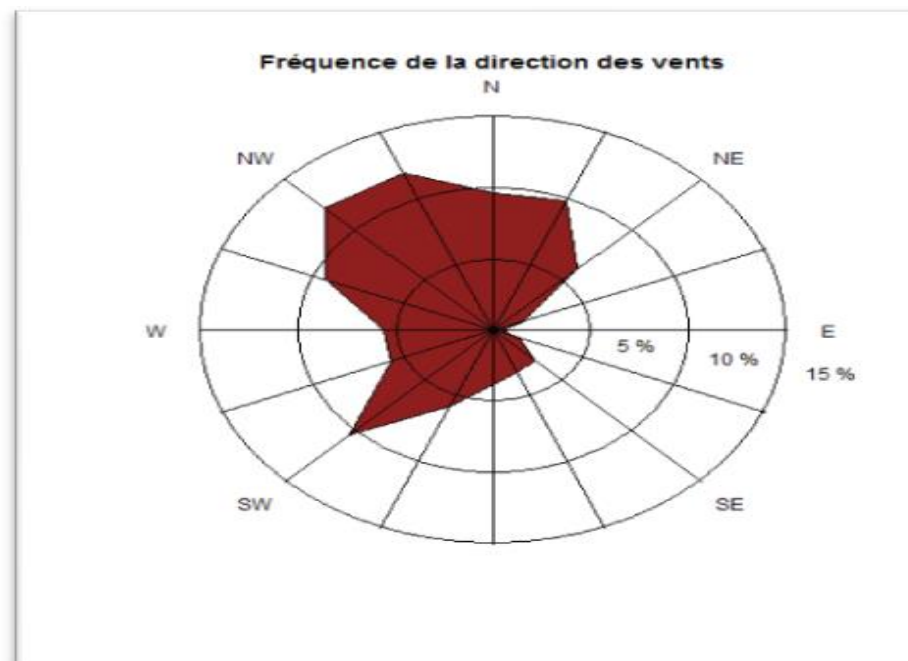


Figure 3.4 : La fréquence de la direction des vents

### 3.1.4.1 Indice d'aridité

Afin de classer le climat de la région d'étude, nous avons calculé l'indice d'aridité de Martonne ( $I$ ) qui est donné par la formule suivante (Equation 1)

$$I = \frac{P}{(T+10)} \quad \text{Equation 1}$$

P : total des précipitations annuelles en (mm) = 151.21 mm

T : température moyenne annuelle en degré Celsius = 18.56°C

D'après PREVOST [134], L'indice de De Martonne est d'autant plus bas que le climat est plus aride et nous pouvons distinguer plusieurs classes :

- ✓ Climat très sec ( $I < 10$ )
- ✓ Climat sec ( $10 < I < 20$ )
- ✓ Climat humide ( $20 < I < 30$ )
- ✓ Climat très humide ( $I > 30$ )

La valeur de l'indice d'aridité de la région de Laghouat est de 5.29, cet indice permet de classer la région dans un climat très sec.

### 3.1.4.2 Synthèse climatique de la région de Laghouat

D'après DAJOZ [135], la pluviométrie et la température, sont les éléments les plus importants pour le développement des êtres vivants. Il serait donc intéressant d'utiliser ces deux principaux facteurs climatiques pour construire le Diagramme Ombrothermique de Bagnouls et Gausson et le climagramme d'Emberger.

Le diagramme Ombrothermique de Bagnouls et Gausson est une méthode graphique qui permet de définir les périodes sèche et humide de l'année, où sont portés en abscisses les mois, et en ordonnées les précipitations (P) ainsi que les températures (T), avec une échelle de  $P = 2T$ .

BAGNOULS et GAUSSEN [136], considèrent qu'un mois est sec lorsque le rapport  $P/T$  est inférieur ou égal à 2 ( $P/T \leq 2$ ).  $P$  étant le total des précipitations mensuelles exprimées en (mm),  $T$  étant la température moyenne mensuelle (en °C).

Ces auteurs préconisent ensuite pour la détermination de la période sèche de tracer le diagramme Ombrothermique qui est un graphique sur lequel la durée et l'intensité de la période sèche se trouvent matérialisées par la surface de croisement ou la courbe thermique passe au-dessus de la courbe des précipitations. Le diagramme Ombrothermique de la région de Laghouat révèle l'existence d'une seule période sèche qui s'étale durant toute l'année (figure 3.5).

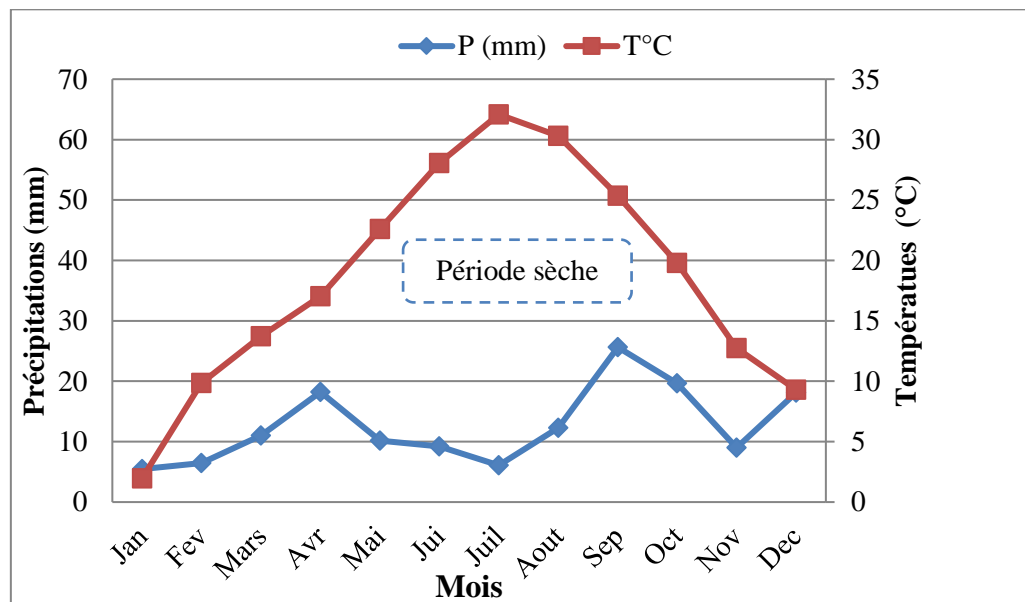


Figure 3.5 : Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gausсен de la période (1996-2016) de la région de Laghouat

Le climagramme d'Emberger permet, grâce au quotient pluviométrique d'Emberger ( $Q_2$ ) spécifique au climat méditerranéen, de situer une zone d'étude dans un étage bioclimatique.

Selon PREVOST [134], le climagramme d'Emberger est représenté en abscisse par la moyenne des minima des températures du mois le plus froid, et en ordonnées par le quotient pluviométrique  $Q_2$  d'Emberger, nous avons utilisé la formule de STEWART (1969) adaptée pour l'Algérie (Equation 2) :

$$Q_2 = 3.43 \times \frac{p}{(M-m)} \quad \text{Equation 2}$$

Avec :

$Q_2$  : Quotient pluviothermique d'Emberger.

P : moyenne des précipitations annuelles en mm = 151.21 mm

M : moyenne des températures maximales du mois le plus chaud = 33.5°C

m : moyenne des températures minimales du mois le plus froid = 0.4 °C

Après application de la formule de Stewart, nous avons obtenu  $Q_2 = 15.66$  pour une période de 21 ans de 1996 à 2016. L'intersection de cette valeur ( $Q_2$ ) avec la valeur de la température minimale ( $m = 0.4$  °C) permet de placer la région de Laghouat dans l'étage bioclimatique aride à hiver frais (figure 3.6).

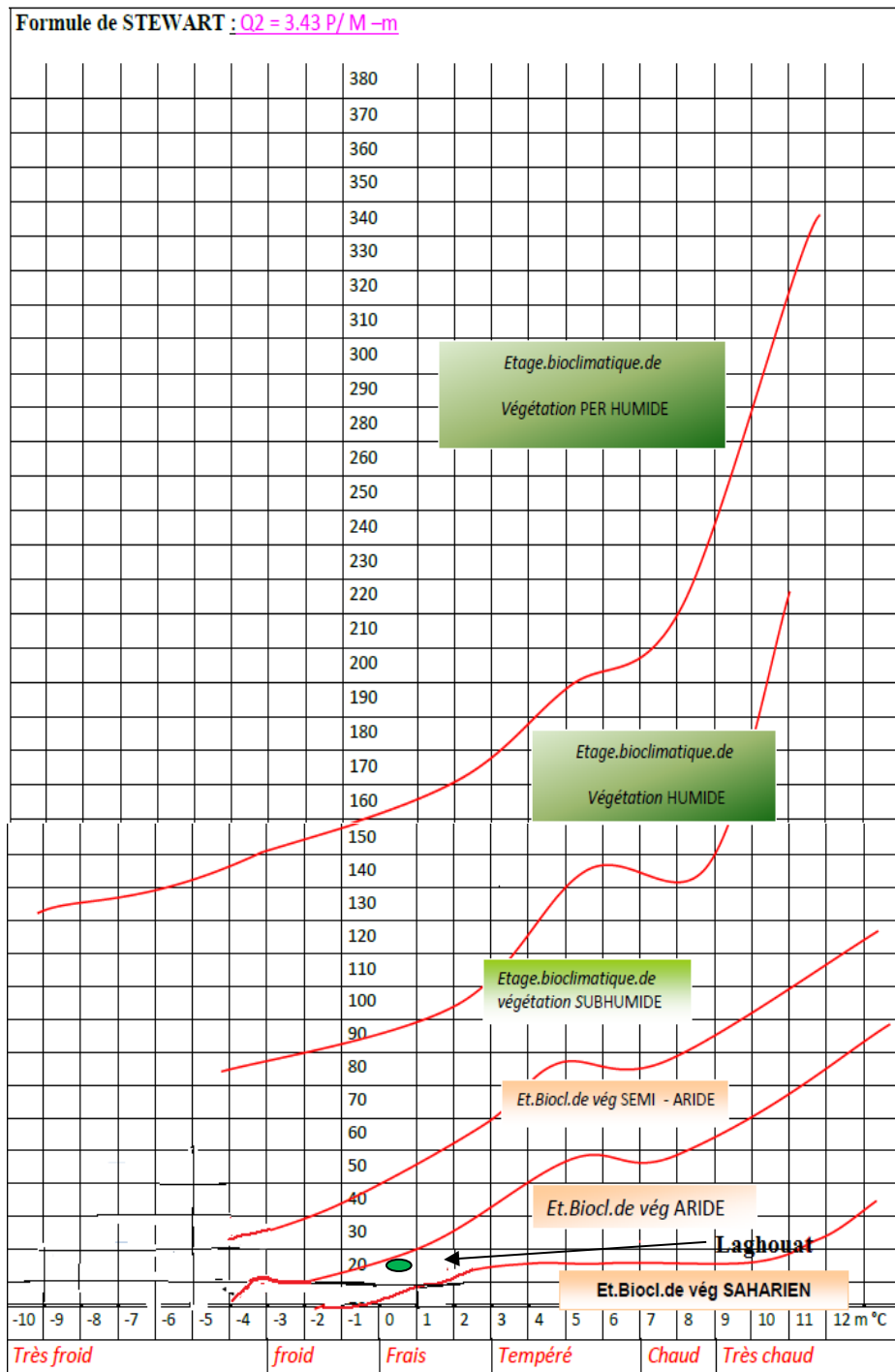


Figure 3.6 : Climagramme pluviothermique d'Emberger pour la région de Laghouat (1996 -2016)



### 3.2 Etude floristique de la zone ensablée de Mokrane

L'étude de la végétation qui colonisent les accumulations sableuses a commencé en mois de Mars de l'année 2009, un suivi de cette végétation a été fait chaque année jusqu'à l'année 2015. Nous avons utilisé la méthode sigmatiste de BRAUN BLANQUET *et al.* [137], 12 relevés linéaires ont été réalisés dans la direction des vents dominants (Nord et Nord- Ouest), en fonction de la physionomie de la végétation et selon la méthode de DJEBAILI [44] sur des aires minimales variant entre 128 et 160 m<sup>2</sup> (figure 3.7), les coordonnées des relevés sont décrits en appendice B.

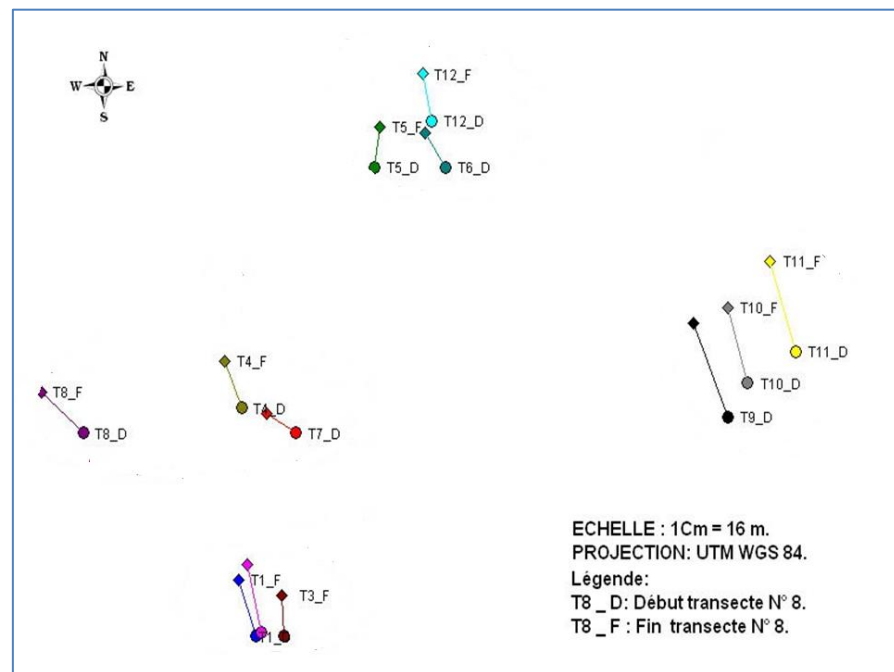


Figure 3.7 : Répartition et localisation des transects par rapport à la direction du vent dominant (Nord-ouest)

Pour avoir un bon aperçu de la diversité et de l'hétérogénéité des formations végétales présentes, nous avons réalisé ces relevés phytosociologiques. Cette notion importante pour la qualité de l'information a été associée à celle de l'aire minimale qui joue un rôle de premier ordre car elle permet la comparaison floristique de relevés spatialement dispersés, elle varie en fonction de chaque groupe végétal. A ce propos, DJEBAILI [44] a signalé qu'en zone aride, la richesse floristique

dépend essentiellement du nombre d'espèces annuelles présentes au moment de l'exécution du relevé. Elle est de 100 m<sup>2</sup> voire 200 m<sup>2</sup> dans le Sud du Sahara septentrional.

D'une manière générale, trois grandes unités physiologiques se discriminent bien dans l'espace dominé par les espèces suivantes (*Retama raetam*, *Aristida pungens*, *Astragalus armatus* et *Euphorbia guyoniana*). Cette différenciation constitue la base d'un premier niveau de zonage. Elle a orienté la première phase de l'échantillonnage stratifié de terrain en ce sens que les relevés floristiques ont été effectués dans chacune de ces trois grandes unités.

Le relevé linéaire a été fait sur une longueur de 20 m, les points de lecture ont été pris chaque 20 cm, sur chaque relevé 100 points de lecture ont été notés. La richesse floristique, l'indice de Shannon, l'équitabilité, le taux de recouvrement du sable et le taux de la végétation ont été évalués. L'indice de Shannon (H') est l'indice le plus simple et le plus largement utilisé pour évaluer une diversité. Plus la valeur de l'indice H' est élevée plus la diversité est grande. L'évaluation de l'équitabilité est utile pour détecter les changements dans la structure d'une communauté et a quelquefois prouvé son efficacité pour détecter les changements d'origine anthropique. Ce groupe d'indices prend en compte la fréquence mesurée des espèces. Ils sont donc plus sensibles aux espèces les plus fréquentes qu'à la richesse spécifique totale [138]. Nous avons aussi calculé l'indice de Simpson, la diversité spécifique est la plus élevée quand l'indice de Simpson est le plus faible.

Enfin, afin d'apprécier l'état de dégradation du parcours en ce qui concerne la valeur pastorale, nous avons réalisé une étude pastorale de cette zone ensablée, un indice de perturbation (IP= thérophytes + chaméphytes /total des espèces) a été calculé.

### 3.2.1 Analyse du patrimoine biologique

#### 3.2.1.1 Richesse totale (S)

Elle représente en définitif un des paramètres fondamentaux caractéristique d'un peuplement et représente la mesure la plus fréquemment utilisée de la

biodiversité. La richesse totale S, est le nombre total d'espèces que comporte le peuplement considéré dans un écosystème donné [138].

Pour classer la richesse totale de la zone d'étude, nous avons utilisé l'échelle de DAGET et POISSONET [139] :

- Raréfiée : < de 5 espèces.
- Très pauvre : de 6 à 10 espèces.
- Pauvre : de 11 à 20 espèces.
- Moyenne : de 21 à 30 espèces.
- Assez riche : de 31 à 40 espèces.
- Riche : de 41 à 60 espèces.
- Très riches : de 61 à 75 espèces.

### 3.2.1.2. Recouvrement global de la végétation

Le recouvrement total de la végétation (RG) est défini théoriquement comme le pourcentage de la surface du sol qui serait recouverte par les végétaux [140].

$$RG(\%) = \frac{n}{N} \times 100 \quad \text{Equation 3}$$

Avec :

n : Le nombre de point de végétation

N : Le nombre total de points de contacts ou de lecture

### 3.2.1.3 La fréquence spécifique $F_{Si}$

La fréquence spécifique ( $F_{Si}$ ) est le nombre de points de lecture ou un taxon donné, i est relevé « présent » lors d'un comptage sur les lignes de lecture. La fréquence d'une espèce i ( $F_{Si}$ ), est égale au nombre de points ou cette espèce a été observée le long d'une ligne disposée dans la végétation [140].

$$F_{Si}(\%) = \frac{n_i}{N} \times 100 \quad \text{Equation 4}$$

Avec N : Abondance du peuplement, ni Abondance de l'espèce i

#### 3.2.1.4 La contribution spécifique $C_{Si}$

La contribution spécifique ( $C_{Si}$ ) d'une espèce  $i$  définit sa participation au tapis végétal. Elle est égale au quotient de la fréquence spécifique centésimale de ce taxon ( $F_{Si}$ ) par la somme des fréquences spécifiques de tous les taxons rencontrés dans le relevé [139].

$$C_{Si}(\%) = \frac{F_{Si}}{\sum F_{Si}} \times 100 \quad \text{Equation 5}$$

#### 3.2.1.5 Indice de diversité de Shannon-Weaver ( $H'$ )

Dans l'évaluation de la diversité spécifique ou indice de Shannon, interviennent en principe les abondances (traduisant le nombre d'individus ou effectif) des espèces constitutives de la biocénose (ou de la communauté) [141], l'indice de Shannon se formule ainsi :

$$H' = -\sum P_i \times \log_2 P_i \quad \text{Equation 6}$$

Avec :

$P_i$  : Abondance relative de l'espèce de rang  $i$  ;

$P_i = n_i/N$ , c'est -à-dire l'abondance relative de l'espèce  $i$  (effectif  $i$ / effectif global). Elle rend compte indirectement de la probabilité de « voisinage » autrement dit la compétition des individus de l'espèce  $i$  avec ceux des autres espèces.

$N$  : Abondance du peuplement,  $n_i$  Abondance de l'espèce  $i$  ; (Les logarithmes utilisés étant de base 2,  $H'$  s'exprime en bit : binary digit).

L'indice de Shannon est pratiquement indépendant de la taille de l'échantillon et tient compte de l'abondance de chaque espèce [135]. La valeur de

l'indice varie de 0 (une seule espèce, ou bien une espèce dominant très largement toutes les autres) à  $\log S$  (lorsque toutes les espèces ont la même abondance).

#### 3.2.1.6. Equitabilité ( $E_Q$ )

L'équitabilité ( $E_Q$ ) exprime la régularité de la répartition équitable des individus au sein de la communauté végétale (espèces). Elle permet de comparer la structure des peuplements, elle constitue une seconde dimension fondamentale de la diversité du peuplement étant donné qu'elle rend compte de la distribution du nombre d'individus par espèce. C'est le rapport de la diversité d'un peuplement ou d'un échantillon et du nombre  $N$  d'espèces présentes dans le lieu. Il est calculé à partir de la formule suivante (Equation 7) :

$$E_Q = \frac{H'}{\log_2(N)} \quad \text{Equation 7}$$

Avec :

$H'$  : Diversité spécifique

$N$  : Nombre d'espèces présentes

L'équitabilité varie entre 0 et 1. Elle tend vers 0 quand la quasi-totalité des effectifs appartient à une seule espèce. Par contre elle se rapproche de 1 lorsque chaque espèce est représentée par le même nombre d'individus [138].

#### 3.2.1.7 Diversité biologique (Le spectre biologique)

Les types biologiques ou formes biologiques désignent le comportement adaptatif de l'espèce. Elle renseigne sur la formation végétale, son origine et ses transformations. Selon AIDOU [142], ces types renseignent ainsi sur les formes de croissance et donc sur la réponse des végétaux aux conditions locales de milieu et de perturbation.

Ces types ont été établis par Raunkiaer pour les végétaux des régions tempérées où la saison défavorable est la saison froide. Mais ils peuvent être appliqués aux végétaux des régions où la saison défavorable est la saison sèche. Ces types sont classés en 5 types :

- Phanérophytes : Ce sont des végétaux supérieurs dont les bourgeons de rénovation sont situés à plus de 50 cm du sol qui ne sont pas protégés ; ce sont des arbres, des arbustes ou de ligneuses.
- Chaméphytes : Espèces ligneuses ou suffrutescentes pérennes dont les bourgeons de rénovation sont situés à 50 cm du sol au maximum.
- Hémicryptophytes : Ce sont des plantes pérennes dont les bourgeons de rénovation affleurent à la surface du sol.
- Géophytes : Ce sont des plantes dont les bourgeons de rénovation sont enfouis dans le sol.
- Thérophytes : Ce sont des plantes annuelles qui forment leurs spores ou graines au cours d'une seule période de vie.

#### 3.2.1.8 Diversité phytogéographique

La phytogéographie est l'étude de la répartition des espèces végétales à la surface du globe. Le fait qu'une espèce ne dépasse pas les limites de son aire de répartition dépend de plusieurs facteurs dont le climat, le sol, l'histoire ou l'isolement par des obstacles naturels [141]. La détermination des affinités chorologiques des différentes espèces a été faite à l'aide des subdivisions chorologiques de QUEZEL [143].

#### 3.3 La productivité pastorale de la zone de Mokrane

Le pouvoir nutritionnel des pâturages fait intervenir un ensemble de paramètres liés à la phytomasse présente et à l'animal auquel elle est offerte [139].

La productivité pastorale correspond à la quantité d'énergie produite par le tapis végétal par unité de surface et par unité de temps, elle est exprimée en (UF. ha<sup>-1</sup>.t<sup>-1</sup>). Pour son calcul nous avons adopté la formule (Equation 8), développée et utilisée dans de nombreux travaux, portant sur la steppe algérienne [144, 145]. Elle est représentée par la régression entre la valeur pastorale et la productivité fourragère d'un parcours.

$$Pr = 6,74 V_p + 14,77 \quad \text{Equation 8}$$

Avec : Pr : Productivité pastorale du faciès en UF/ha ;  $V_p$  : Valeur pastorale

Le comportement des animaux vis-à-vis des espèces présentes dans un pâturage n'est pas le même. Aussi bien qu'en conditions naturelles, il y a toujours, même dans les meilleurs pâturages, des plantes fourragères et d'autres espèces pouvant être refusées par les animaux. Le goût, l'aspect et l'odeur des plantes induit une certaine sélectivité parmi les végétaux, dans laquelle la composition chimique de la plante joue un rôle primordial. C'est celle-ci donc qui valorise le pâturage, elle-même conditionnée par le climax édaphique environnement [146]. D'après AIDOUUD [144], la valeur pastorale est une évaluation allo métrique qui peut être valablement utilisée pour l'estimation de la production fourragère des parcours, Elle est exprimée en multipliant les contributions de diverses espèces présentes par les indices correspondants à chacune d'entre elles et en additionnant les valeurs obtenues [139 ; 145]. Pour l'évaluation de la valeur pastorale nous avons utilisé (*Equation 9*) que HIRCHE et *al.* [145] avaient utilisé pour l'estimation de la valeur pastorale de certains parcours dans la steppe Algérienne. Cette équation a été proposée par Delpech (1960), reprise et développée par DAGET et POISSONET (1965) in DAGET [146].

$$V_p = 0,1 \times R_G \times \sum C_{si} \times I_{si} \quad \text{Equation 9}$$

Avec :

$C_{si}$  : Contribution spécifique des espèces végétales

$I_{si}$  : Indice spécifique des espèces végétales

$R_G$  : Recouvrement globale de la végétation.

Les indices spécifiques de la végétation de la steppe algérienne ont une expression synthétique, déterminé empiriquement suivant une échelle numérique établie par AIDOUUD [142] et reposant sur un ensemble d'informations disponibles

(qualité bromatologique, digestibilité, appréciations des éleveurs de la steppe). Ils ont permis d'obtenir une valeur exprimée sous la forme d'un score ou d'une note pour chacune des espèces, et que nous aussi avons utilisée dans cette étude.

### 3.3.1 La charge pastorale du parcours

La charge animale est définie comme le nombre de bétail qu'un parcours est susceptible de nourrir. Elle est souvent rapportée au nombre de tête de bétail par unité de surface. Elle fait intervenir la production consommable d'un parcours et les besoins de l'animal selon le rapport donné par l'équation 10 [144].

$$C = \frac{\text{Besoin d'un mouton}}{\text{Productivité pastorale du parcours}} \quad \text{Equation 10}$$

Avec :

C : la charge animale par (ha)

Besoin d'un mouton : Sont de l'ordre de (400 UF/an) moyenne estimée pour un mouton dans la steppe algérienne [144]. Valeur utilisée pour l'estimation de la charge animale dans notre cas.

### 3.4. Mesure de la hauteur des sédiments accumulés sous et hors de la canopée

Nous avons mesuré les hauteurs des sédiments accumulés sur la surface du sol de la zone d'étude par des mesures topographiques, la méthode utilisée est celle du nivellement du terrain par cheminement, nous avons ainsi adopté pour nos calculs, la méthode des moindres carrés.

Nous avons utilisé un théodolite (figure 3.8) avec lequel nous avons enregistrées les niveaux des élévations marquées par une règle de mise à niveau graduée (La mire) positionnée sur les sédiments accumulés sous la végétation correspondante observée et hors végétations, et ce le long de chacun des 12 relevés linéaires réalisés pour l'étude floristique en directions des vents dominants, les lectures ont été faites chaque 20 cm du relevé linéaire , soit au totale 1200 points



de lectures. La différence entre deux élévations correspond à la hauteur recherchée pour les accumulations des sédiments hors et sous la végétation (figure 3.9).

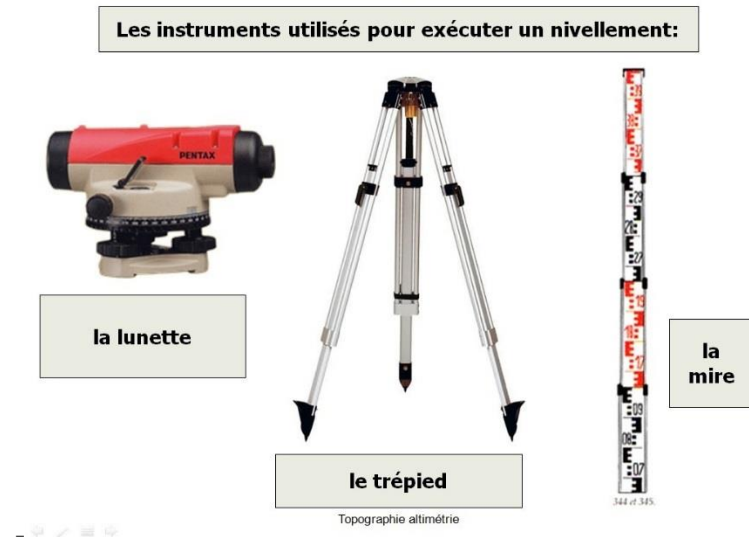


Figure 3.8 : Instruments utilisés pour mesurer la hauteur des sédiments accumulés

Les Sédiments accumulés sont décrits comme : des dépôts de particules non compactés sur la surface du sol, qui proviennent d'autres endroits, notamment des terres défrichées et dégradées, le vent est leur agent de transport principal. Si ces dépôts de formes et de tailles différentes sont colonisés par la végétation naturelle, ils sont appelés des sols fixés ; Si aucune plante n'y pousse, ils sont appelés des sols non fixés.

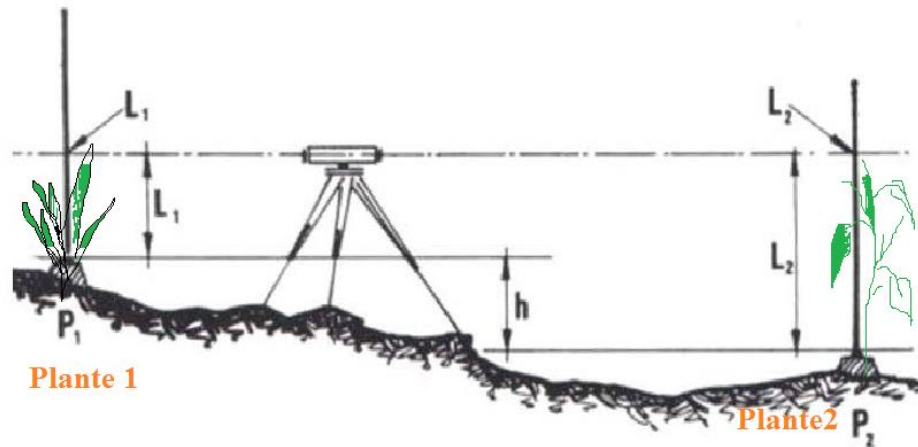


Figure 3.9 : Schéma démontrant la méthode de nivellement pour calculer la hauteur ( $h$ ) des sédiments accumulés

Afin d'avoir des valeurs comparables sans effet de pente pour chaque relevé linéaire, nous avons pris les valeurs mesurées de la hauteur de sédiments accumulés que nous avons enregistrés avec le théodolite et nous avons annulé la pente du terrain. Ceci est expliqué dans la figure 3.10 a : (i) la pente de chaque transect est déterminé par un ajustement linéaire de l'altitude mesurée ( $h$ ) à une distance ( $x$ ), voir (Equation 11) :

$$h = a \cdot x + \alpha \quad (1) \quad \text{Equation 11}$$

Les valeurs de la pente  $a$  et de la valeur  $\alpha$  dans l'équation (11) sont déterminés par le principe de la méthode des moindres carrés.

(ii) pour chaque point sur le transect, la hauteur des sédiments accumulés est corrigée pour la pente (Figure 3.10b).

$$h_{ic} = h_{im} - (a \cdot x_i + \alpha) \quad \text{Equation 12}$$

Avec  $h_{ic}$  est la hauteur corrigée de la pente,  $h_{im}$  est la hauteur mesurée et  $x_i$  est la position (m) du point  $i$  sur le transect.

(iii) Enfin la hauteur corrigée pour la pente est remis à zéro (Figure 3.10 c) :

$$h_{ic0} = h_{ic} - \min(h_{ic}) \quad \text{Equation 13}$$

Avec  $h_{ic0}$  est la hauteur corrigée pour la pente à zéro et  $\min(h_{ic})$  est le minimum de  $h_{ic}$  sur le transect.

(iv) pour chaque relevé linéaire, la hauteur absolue est transformé en hauteur relative (Figure 3.10d), nous obtenons la hauteur des sédiments accumulés ( $h_i$ ) pour chaque occupant comme :

$$h_i = \frac{(h_{ic0}-0)}{(\max(h_{ic0})-0)} \quad \text{Equation 14}$$

Avec  $\max(h_{ic0})$  est le maximum de  $h_{ic0}$  sur le transect du relevé. L'ensemble des transects étaient orientés dans la direction [Nord - Ouest] des vents érosifs dans la région étudiée.

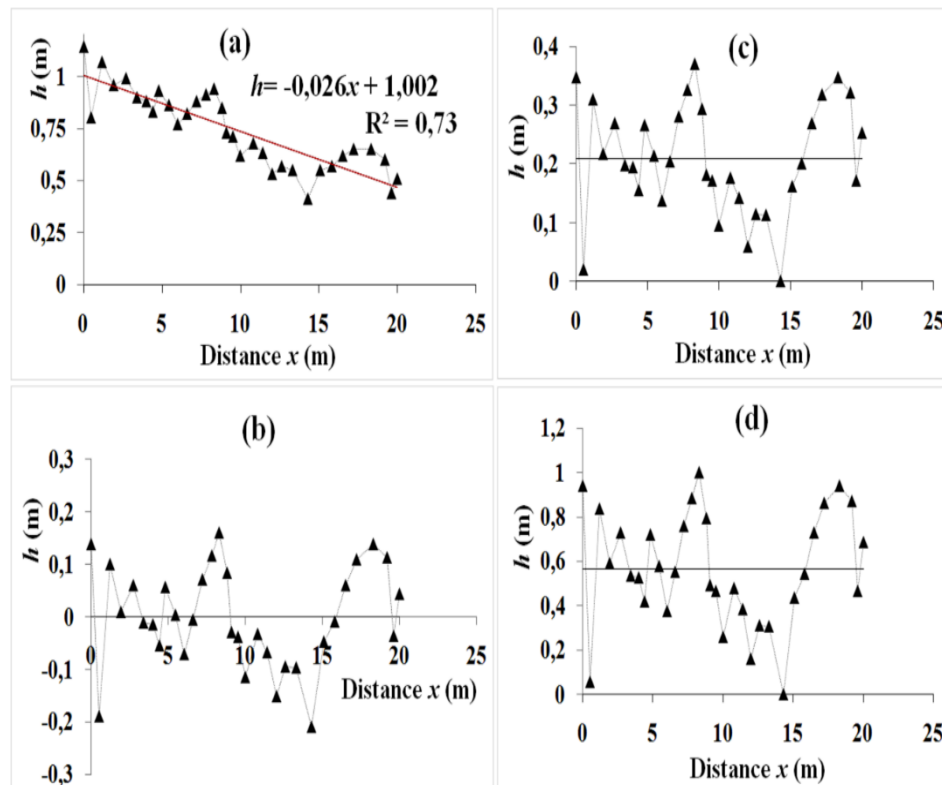


Figure 3.10 : Exemple de correction de la pente du terrain pour le calcul de la hauteur  $h$  des sédiments accumulés (transect 9, orienté 295 (°)).

- (a) détermination de la pente moyenne du transect par ajustement linéaire de l'élévation mesurée ( $h$ ) en (m) et de la distance ( $x$ ) par le principe de la méthode des moindres carrés. (b) Hauteurs des sédiments accumulés corrigées pour la pente. (c) hauteurs corrigées des sédiments accumulés mis à zéro. d) hauteurs absolues transformées en hauteurs relatives.

Dans la figure 3.11, nous avons démontrés les aspects des différentes élévations des accumulations sableuses que nous avons mesurées, sous et hors végétation dans la zone de Mokrane.



Figure 3.11 : Représentation des hauteurs calculées (h) des sédiments accumulés

### 3.5. Caractéristiques du sol sous la végétation et hors végétation

#### 3.5.1 Echantillonnage

Afin d'étudier les caractéristiques du sol sous la végétation et hors végétation des accumulations sableuses de la zone de Mokrane. Trois espèces hôtes ont été choisies pour cette étude à savoir : *Retama raetam*, *Aristida pungens* et *Astragalus armatus*, en raison de leur dominance continue dans la zone d'étude.

Nous avons pris au hasard 8 (buttes) accumulations sédimentaires associées à chaque espèce hôte (sol fixé) et 8 accumulations sédimentaires non colonisées par la végétation (sol non fixé). L'échantillonnage a été réalisé en mois

de mars 2014, les échantillons du sol ont été prélevés dans les 30 premiers centimètres de chaque butte, à une distance de 10 à 15 cm du centre de la plante hôte [147], nous avons prélevé 500 g de sol pour chaque échantillon à la fin de la saison des pluies. Nous avons transporté les échantillons rapidement au laboratoire pour faire des mesures concernant la texture, l'humidité, le dosage du calcaire, de l'azote, du carbone, le pH, la CE et la richesse microbienne.

### 3.5.2 L'analyse physique du sol

#### 3.5.2.1 Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique a été effectuée sur une prise d'essai de terre fine (éléments < 2mm). Elle a pour but de déterminer le pourcentage des différentes fractions de particules minérales constituant les agrégats. Nous avons utilisé la méthode du tamisage (voie sèche) et la méthode de sédimentation (voie humide) pour déterminer les fractions des argiles et des limons décrite par SOLTNER [148].

Dans un premier temps, afin de pouvoir séparer correctement les différentes classes granulométriques, il est indispensable de détruire la matière organique et les carbonates. La matière organique est détruite par ajout d'eau oxygénée (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 6 %) dans un Erlen (200 ml) placé dans un bain marie à 40°C. Le traitement est terminé une fois que plus aucune réaction n'est observée (effervescence) entre la solution et le sol. Les carbonates sont détruits par ajout de HCl (2%) et le sol est ensuite rincé par ajout de 200 ml d'eau qui sont renouvelés toutes les 24 heures jusqu'à obtenir un pH proche de celui de l'eau. L'échantillon de sol est par la suite séché à 105 °C jusqu'à stabilisation du poids.

La détermination de la distribution granulométrique du sol a été effectuée en deux étapes, soit :

1/ Le tamisage mécanique des particules dont la grosseur est compris entre 50 µm et 2000 µm. Six classes de particules minérales identifiées par leur taille après destruction de la matière organique :

- Argiles et limons : < 50 µm,
- Sables fins : 50 à 250 µm,

- Sables moyens : 250 à 500  $\mu\text{m}$ ,
- Sables grossiers : 500  $\mu\text{m}$  à 800  $\mu\text{m}$ ,
- Fraction érodible < 840  $\mu\text{m}$ ,
- Sable très grossiers et cailloux 800  $\mu\text{m}$  à 2000  $\mu\text{m}$ .

2/ L'essai sédimentométrique est par la suite effectué sur la portion des particules de dimensions inférieures à 50  $\mu\text{m}$ . La sédimentation est basée sur la loi de Stokes. La vitesse de chute d'une particule sphérique, tombant librement dans un fluide, est proportionnelle au carré de son rayon et à sa densité. Cette vitesse est aussi en relation avec la viscosité et la densité du fluide (l'eau, dans le cas présent).

D'après WINDISCH [149], il est possible de relier cette vitesse de chute au diamètre (D) des particules à partir de l'équation 15, dérivée de la loi de Stokes :

$$D = \sqrt{\frac{18 \, n \, v}{G_s - G_w}} \quad \text{Equation 15}$$

Avec : n = viscosité du fluide (g/cm $\times$ s)  
 v = vitesse de chute des particules (cm/s)  
 G<sub>s</sub> = densité relative des solides  
 G<sub>w</sub> = densité relative du fluide (varie avec la température)

Les conditions de l'essai (température, agent dispersant) influencent les résultats obtenus. Quelques corrections sont nécessaires. Une correction combinée pour l'agent dispersant et la température doit être effectuée en cours d'essai à partir de lectures sur un cylindre témoin [149].

### 3.5.2.2 Mesure du pH

Le pH désigne l'état d'acidité ou d'alcalinité du sol c'est un facteur qui influe directement sur l'absorption des éléments nutritifs. Cette mesure a pour but de doser la proportion des ions H<sup>+</sup> dans le sol, plus que ce rapport est élevé, plus le pH est basique (>7) et plus qu'il est faible, plus le pH est acide (<7).

La mesure se fait avec un pH mètre (mesure électrique) : le pH est mesuré sur une suspension terre /liquide préparée au rapport 1/2,5 [148]. Le liquide utilisé est de l'eau distillée (mesure du pH-eau).

### 3.5.2.3 Mesure de la conductivité électrique

La conductivité électrique (est symbolisée par CE), les mesures ont été effectuées sur un échantillon de sol remanié et homogénéisé avec une dilution de 1/5 à l'aide d'un conductivimètre électrique. Elle dépend de la quantité des sels en solution, mais aussi de la température et de la teneur en eau, la conductivité doit être mesurée dans des conditions standard et à humidité constante [148].

### 3.5.2.4. Dosage du calcaire total

A l'aide du calcimètre Bernard, nous avons dosé le calcaire total dans le sol. Il s'agit de décomposer le carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) par l'acide chlorhydrique [150]. le taux du calcaire total est donné par le biais de la formule suivante :

$$\mathbf{CaCO_3total(\%)} = \frac{V_E}{P_E} \times \frac{P_T}{V_T} \times \mathbf{100} \quad \text{Equation 16}$$

l) : Volume de  $\text{CO}_2$  Avec:

$V_E$  (ml) : Volume de  $\text{CO}_2$  produit par X g de  $\text{CaCO}_3$  contenu dans un poids  $P_E$  de sol.

$V_T$  (ml) produit par 0,1 g de  $\text{CaCO}_3$  pur et sec.

$P_E$  (g) : poids de la prise d'essai de terre en gramme.

$P_T$  (g): poids pour réaliser le témoin à blanc (0,1g de  $\text{CaCO}_3$ ).

### 3.5.2.5 Détermination de la teneur en matières organiques (MO %)

Nous avons obtenu la valeur du taux de la matière organique, après avoir dosé le carbone organique. Selon MATHIEU et PIELTAIN [150], le dosage du Carbone organique est réalisé par la méthode Anne, le principe réside dans l'oxydation du carbone organique par le bichromate de potassium , l'excès de bichromate non réduit par le carbone organique est alors titré par une solution de

sel de Mohr en présence de diphénylamine dont la couleur passe du bleu foncé au bleu vert. Nous pouvons déduire donc le taux de la matière organique par la formule suivante :

$$CO\% = \frac{MO\%}{1,72} \quad \text{Equation 17}$$

Avec : MO% : Matière organique ; CO% : Carbone organique

### 3.5.2. 6 Détermination de l'azote organique

L'azote total est déterminé par la méthode de Kjeldhal. Cette méthode permet de transformer l'azote des composés organiques en azote ammoniacal par l'acide sulfurique concentré en présence d'un catalyseur. Cette technique se déroule en trois étapes dont la minéralisation des composés organiques, la distillation et le dosage [150].

### 3.5.2.7 Le rapport C /N

Une fois, le carbone et l'azote dosés. On peut calculer le rapport C/N qui traduit l'intensité de l'activité microbologique du sol [148].

### 3.5.2.8 L'humidité du sol

Afin de mesurer la teneur en eau des échantillons du sol, nous avons pesé un poids de terre humide (P), mis dans une étuve à 105°C. Après séchage, le poids de la terre sèche (P') permet par différence, de connaître l'humidité du sol (H) en % du poids de la terre sèche [148] :

$$H (\%) = \frac{P-P'}{P'} \times 100 \quad \text{Equation 18}$$



### 3.5.3 Analyse de la richesse microbienne

La technique des suspensions-dilutions de sol a été utilisée pour l'estimation globale de la concentration des micro-organismes du sol. 1g de chaque échantillon de sol ont été homogénéisés avec 9 ml de l'eau distillée stérile, 1ml de cette solution est complété par 9 ml d'eau stérile d'où la dilution  $10^{-1}$ .

Nous avons choisis la méthode du dénombrement dans un milieu solide Selon KLEMENT et *al.* [151], la flore bactérienne est mise en évidence par étalement de 0,1ml de la suspension de sol à la surface d'un milieu de culture solide LPGA (*Yeast Peptone Glucose Agar*), coulée dans des boites de pétri. La flore fongique est mise en évidence par incorporation de 0.1 ml de la suspension de sol dans un milieu nutritif solide PDA (*Potato dextrose agar*). L'estimation de la densité de la flore du sol se fait par dénombrement des colonies se développant à la surface du milieu de culture après 2 jours d'incubation à 27°C pour les champignons et 30°C pour les bactéries.

La lecture est effectuée pour 5 dilutions pour ( $10^{-1}$  à  $10^{-5}$ )ne retenir que la dilution qui donne un nombre de colonies compris entre 30 et 300 par boîte de Pétri de 10 cm de diamètre.

Le calcul de la concentration bactérienne N en UFC par ml ou par g de sol, est décrit dans l'équation 19 :

$$N = \frac{\sum \text{colonies}}{V \times 1,1d} \quad \text{Equation 19}$$

Avec: N: Nombre d'UFC par gramme de sol ;  $\sum$  colonies: Somme des colonies des boîtes interprétables; V: Volume de solution déposée (0.1ml); d :Facteur de la première dilution retenue (dans notre cas  $10^{-3}$ ).

Pour l'ensemble de ces analyses, et afin d'estimer statistiquement la validité du résultat, nous avons utilisé à chaque fois, 3 répétitions de chaque échantillon et 3 répétitions de chaque dilution.

La détermination de la charge fongique est faite par comptage des colonies et les résultats sont exprimés en UFC (nombre d'Unités Formant Colonies) / g de sol selon l'équation 20. Seules les boîtes contenant entre 15 et 150 colonies au niveau de deux dilutions successives sont retenues pour le dénombrement [152].

$$N = \frac{\sum \text{colonies}}{V(n_1+0,1n_2) \times d_1} \quad \text{Equation 20}$$

Avec : N: Nombre d'UFC par gramme de sol ;  $\sum$  colonies: Somme des colonies des boîtes interprétables; V: Volume de solution déposée (0.1ml); n1 : Nombre de boîtes considéré à la première dilution retenue; n2: Nombre de boîtes considéré à la seconde dilution retenue; d1 :Facteur de la première dilution retenue.

#### 3.5.4 . Traitements statistiques des données

En utilisant le logiciel XLSTAT (Version 3.5.), nous avons fait une analyse factorielle des correspondances (AFC) et une classification ascendante hiérarchique (CAH) pour évaluer la structure de la communauté végétale existante et l'identification des facteurs favorisant la structuration du milieu. Le logiciel Past (statistiques paléontologiques, version 2,17 c.), a été utilisé afin de comparer la diversité floristique en faisant un test de bootstrap ( $P \leq 0,05$ ). La dissimilarité entre les groupements végétaux a été étudiée par une ANOSIM à l'aide du test de Bray-Curtis au seuil de 5 %, la correction de Bonferroni a été appliquée. La variation du taux de recouvrement dans le temps a été analysée avec une ANOVA au seuil de  $P \leq 0,05$ .

Les hauteurs des sédiments accumulés et les paramètres du sol mesurés ont été analysés par le test ANOVA à un seul facteur contrôlé avec le logiciel Minitab 17.1.0, d'où  $P \leq 0.05$  (Tukey 95%), Les groupement statistiques ont été réalisés à l'aide du test Fisher.

L'analyse en composantes principales (ACP) a été réalisé avec le logiciel XLSTAT (2016.02.28451), et ce pour évoquer la relation entre la présence de la plante et les caractéristiques du sol sous-jacent.

## CHAPITRE 4

### RESULTATS ET DISCUSSION

#### 4.1 Résultats

##### 4.1.1 Etude floristique

Cette étude nous a permis d'identifier 25 espèces appartenant aux 29 genres et 14 familles. Les familles les mieux représentées sont : Asteraceae, Fabaceae et Poaceae avec 20%, 16% et 16% respectivement (figure 4.1).

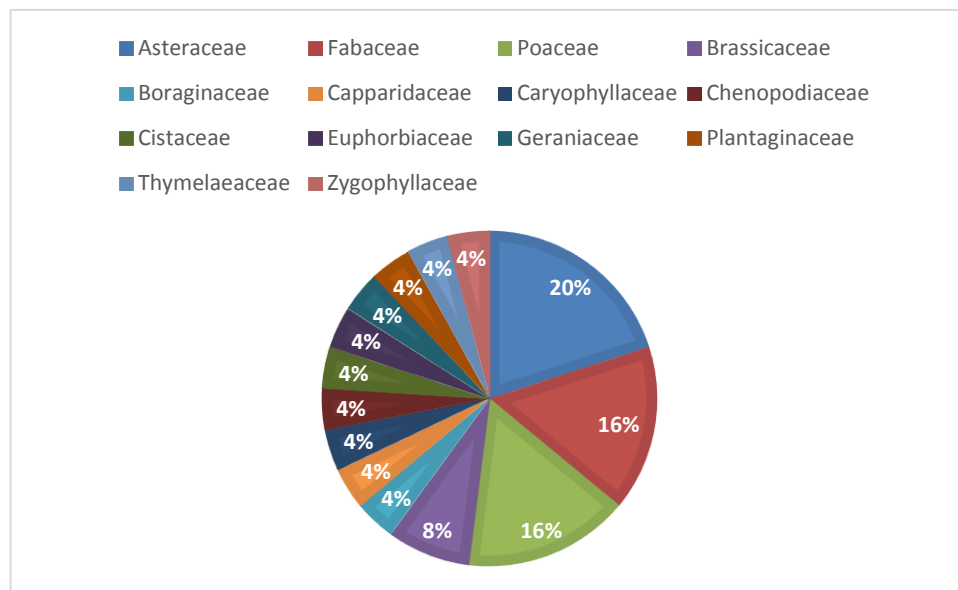


Figure 4.1 : Répartition des familles des espèces végétales dans la zone de Mokrane

Toutes les espèces recensées avec abréviations, familles, cycles, types biologiques et types biogéographiques, sont présentées en détails dans le tableau 4.1.

Tableau 4.1 : Liste des plantes steppiques recensées (2009-2015) dans la zone de Mokrane (P : pérenne, A : annuelle)

N°	Espèces	Famille	Abréviation	Cycle	T. Biologique	Biogéographie
1	<i>Aristida pungens</i> Desf.	Poaceae	<i>A.pungens</i>	P	Hemicryptophyte	Sah, Afr,Du Sud
2	<i>Astragalus armatus</i> Willd.	Fabaceae	<i>A.armatus</i>	P	Chaméphyte	Méd
3	<i>Atractylis serratuloides</i> Sieber ex Cass	Asteraceae	<i>A.serratuloides</i>	p	Chaméphyte	Sah
4	<i>Bromus rubens</i> L.	Poaceae	<i>B.rubens</i>	A	Thérophyte	Med
5	<i>Cleome arabica</i> L.	Capparidaceae	<i>C.arabica</i>	A	Thérophyte	Sah-Sind
6	<i>Echinops spinosa</i> L.	Asteraceae	<i>E.spinosa</i>	P	Chaméphyte	Med
7	<i>Erodium glaucophyllum</i> L.	Geraniaceae	<i>E.glaucophyllum</i>	P	Hemicryptophyte	End.Méd
8	<i>Eruca vesicaria</i> (L)Thell.	Brassicaceae	<i>E.vesicaria</i>	A	Therophyte	Méd
9	<i>Euphorbia guyoniana</i> Boiss & Rent.	Euphorbiaceae	<i>E.guyoniana</i>	P	Hemicryptophyte	End.N.Afr.
10	<i>Evax desertorum</i> Pomel.	Asteraceae	<i>E.desertorum</i>	A	Therophyte	Méd
11	<i>Helianthemum getulum</i> Pomel.	Cistaceae	<i>H.getulum</i>	P	Chaméphyte	Méd.Sah.
12	<i>Ifloga spicata</i> Vahl.	Asteraceae	<i>I.spicata</i>	A	Therophyte	Sah.Sind
13	<i>Launaea resedifolia</i>	Asteraceae	<i>L.resedifolia</i>	P	Hemicryptophyte	Méd.Sah.Arab
14	<i>Malcomia aegyptiaca</i> Spr.	Brassicaceae	<i>M.aegyptiaca</i>	A	Thérophyte	Sah-Ara-Subtrop
15	<i>medicago laciniata</i> L.	Boraginaceae	<i>M.laciniata</i>	A	Thérophyte	Med.Sah.Sind
16	<i>Megastoma pusillum</i> Coss. & Durieu	Boraginaceae	<i>M.pusillum</i>	A	Thérophyte	Méd.
17	<i>ononis pusilla</i> L.	Fabaceae	<i>O.pusilla</i>	P	Hemicryptophyte	Med.
18	<i>Peganum harmala</i> L.	Zygophyllaceae	<i>P.harmala</i>	p	Hemicryptophyte	Irano-Tour
19	<i>Plantago albicans</i> L.	Plantaginaceae	<i>P.albicans</i>	P	Hemicryptophyte	Méd
20	<i>Retama raetam</i> Forssk.	Fabaceae	<i>R.raetam</i>	P	Nanophanérophyte	Sah.Sind.
21	<i>Salsola vermiculata</i> L.	Chenopodiaceae	<i>S.vermiculata</i>	P	Chaméphyte	Sah. Méd
22	<i>Schismus barbatus</i> L.Thel.	Poaceae	<i>S.barbatus</i>	A	Thérophyte	Méd
23	<i>Silene arenarioides</i> Desf.	Caryophyllaceae	<i>S.arenarioides</i>	A	Thérophyte	End . N.Afr
24	<i>stipa tinassicima</i> L.	Poaceae	<i>S.tinassicima</i>	P	Hemicryptophyte	End
25	<i>Thymelaea microphylla</i> Coss et Dur.	Thymelaeaceae	<i>T.microphylla</i>	P	Chaméphyte	End.N.Afr.

L'analyse des types biologiques a démontré la prédominance des thérophytes (Thé.), suivie respectivement des hémicryptophytes (Hém.), chamaephytes (Ch.), et Nanophanérophytes (N.ph.) (figure 4.2), nous avons choisis une présentation en triennale (chaque 3 ans) , vu que le changement dans la végétation n'a commencé qu'en année 2012 ( appendice E et F) .

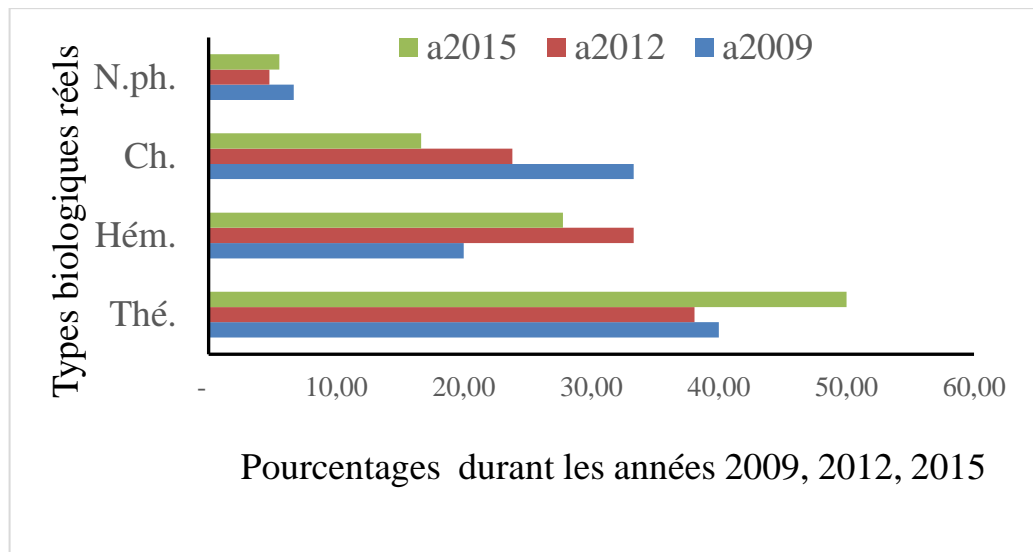


Figure 4.2 : Evolution du Spectre biologique réel de la végétation dans la zone de Mokrane (2009-2012-2015)

L'analyse du spectre phytogéographique a démontré la dominance dans la zone de Mokrane de l'élément méditerranéen, les plantes endémiques méditerranéennes aussi représentent un pourcentage non négligeables (figure 4.3).

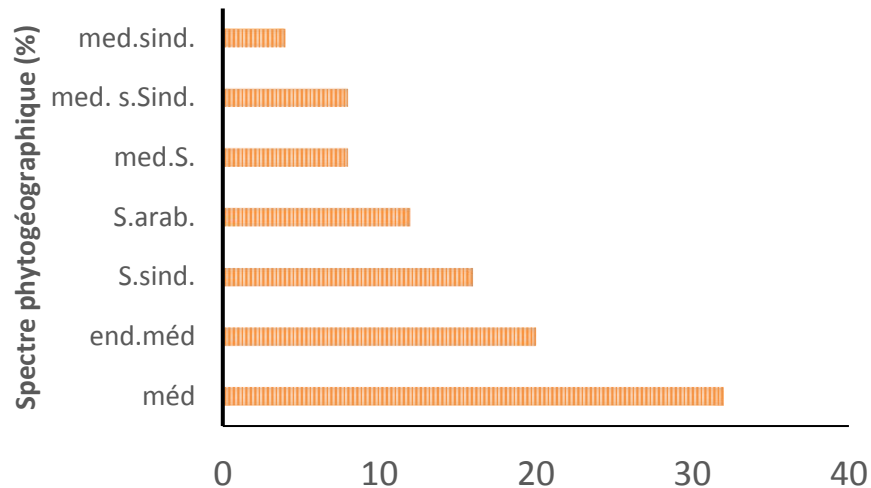


Figure 4.3 : Spectre phytogéographique de la végétation dans la zone de Mokrane

Abréviation : Méd. : Méditerranien, S. : saharien, end. endémique, sind. : indien, arab. : arabe

L'information donnée par les deux axes de l'analyse factorielle des correspondances (AFC) (figure 4.4 ;  $F1 \times F2 = 60,28 \%$ ), suivie de l'analyse hiérarchique des correspondances (CHA, appendice D), nous a permis d'identifier la présence de trois groupements (G) de végétaux à savoir : G1 : *Aristida pungens* et *Retama raetam*, G2 : *Astragalus armatus*, G3 : *Euphorbia guyoniana* et *Megastoma pussillum* (annexe C). Le premier axe a démontré la contribution des espèces typiques aux sols sableux : *Schismus barbatus*, *Echinops spinosus*, *Aristida pungens*, *Bromus rubens* avec des coordonnées (2,1 ; 1,37 ; 1,34 ; 1,34) respectivement sur le côté positive de l'axe F1, ce dernier correspond au facteur ensablement. L'information donnée par l'axe F2 correspond au facteur anthropisation (labour et surpâturage), deux espèces ont contribué positivement dans la formation de l'axe F2, à savoir : *Astragalus armatus* et *Salsola vermiculata* avec des coordonnées sur l'axe F2 de (2,38 ; 1,21) respectivement.

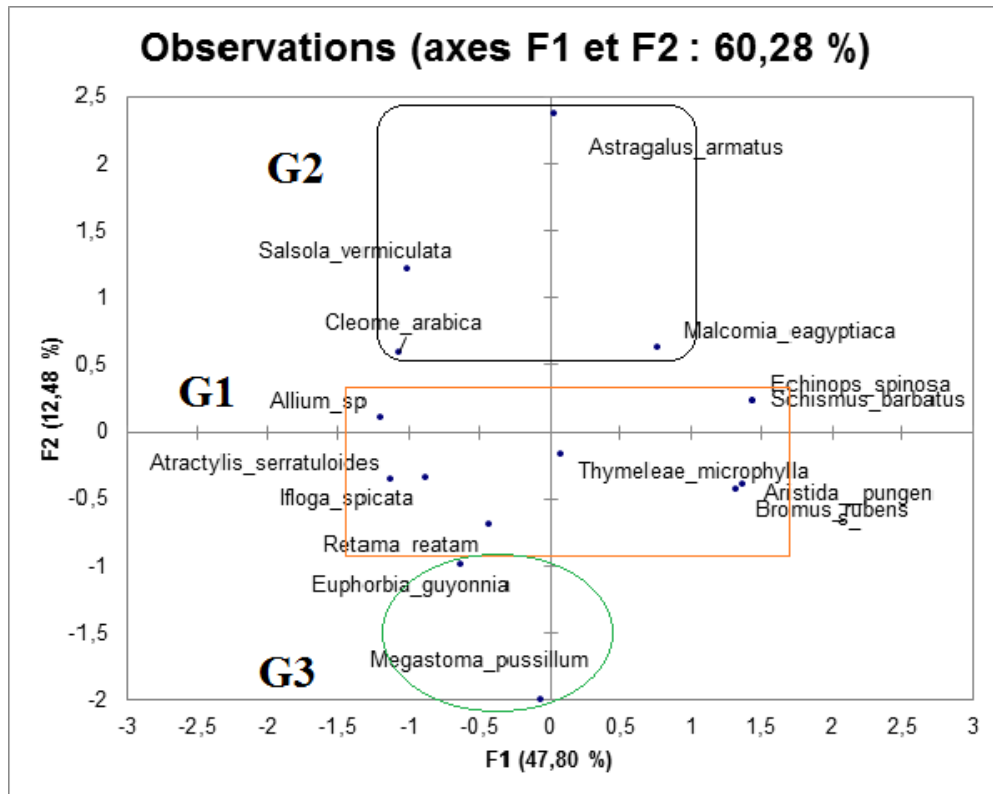


Figure 4.4 : Répartition des groupements végétaux sur les axes 1-2 de l'analyse factorielle (AFC)

Le test de bootstrap a permis de démontrer une différence significative uniquement entre les groupements G2 et G3 pour les indices écologiques tel que, la dominance et l'équitabilité et la diversité (Tableau 4.2).

Tableau 4.2 : Test de « bootstrap » comparant la diversité des communautés végétales (année 2009)

Groupement	G1	G2	G3	Boot (P) : G3/G2
Taxon (S)	12	10	8	0,622
Simpson (1-D)	0,78	0,65	0,82	<u>0,002</u>
Shannon (H')	1,82	1,45	1,84	<u>0,011</u>
Equitabilité	0,73	0,63	0,88	<u>0,001</u>

G : groupement végétal, Boot (P) : valeur de P du test de bootstrap

En utilisant le test de dissimilarité de Bray-Curtis (Dbc) entre les groupes, ANOSIM a indiqué une dissimilarité non significative en espèces ( $P = 0,07$  ;  $R = 0,23$ ), en statistique R indique l'ampleur de la séparation dans la structure de la communauté si ( $R = 1$ ), ou ( $R = 0$ ) si aucune séparation ne se produit. La valeur de  $R = 0,23$  indique que les groupes ne sont pas bien séparés, G2 et G3 sont significativement différents en espèces végétales ( $P = 0,04$ ). Le groupement G2 (*Astragalus armatus*) semble le moins diversifié ( $H' = 1,45$ ) avec une équitabilité la plus faible (0,63), cela indique l'action d'origine anthropique.

Durant six ans d'étude, la diversité et l'équitabilité ont montré une légère amélioration, cependant le milieu demeure faible en espèces végétales, l'indice de Shannon ( $H' = 2,07$  Bits) et l'indice de Simpson (0,85) indiquent que la diversité est faible, le calcul de l'équitabilité a montré que la répartition des espèces est plus ou moins équitable (tableau 4.3).

Tableau 4.3 : Indices de la diversité floristique du milieu durant les années 2009-2012-2015

Année	2009	2012	2015
Taxon (S)	15	21	18
Indice de Simpson	0,75	0,83	0,82
Indice de Shannon ( $H'$ )	1,80	2,07	2,03
Equitabilité	0,66	0,68	0,70

Le test de bootstrap réalisé pour comparer la diversité entre toutes les années d'étude, a fait ressortir que le changement dans la végétation devient significatif en année 2012, le détail est présenté en appendice E, cela explique et justifie le choix de présenter uniquement la dynamique dans un intervalle de 3 ans (2009-2012-2015), rappelant aussi que un manque de données a été enregistré en année 2013 (appendice F).



La couverture végétale (RV) a augmenté significativement entre l'année 2009 à l'année 2015 ( $P = 0,01$ ), la couverture en sable a diminué significativement ( $P=0,001$ , figure 4.5) la moyenne de RV est de 49,57% et du RNV (sable, litière, cailloux et pellicule de glaçage) est égale à 50,82 %, la moyenne des précipitations était de 139,08 mm/an.

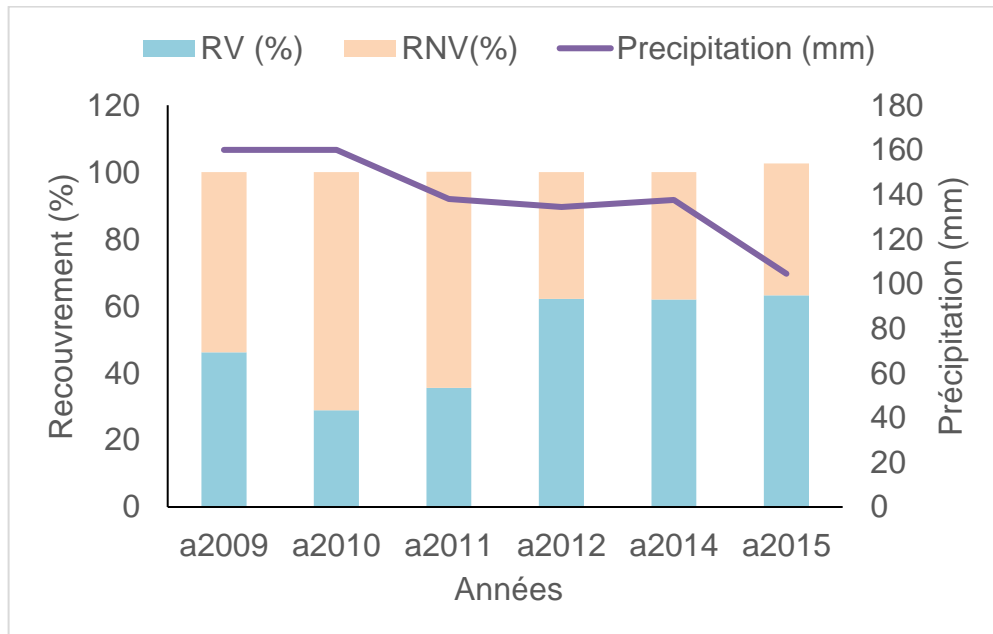


Figure 4.5 : Suivi du recouvrement et des précipitations de la zone de Mokrane (2009-2015)

RV : Recouvrement végétal, RNV ; Recouvrement non végétal

Les contributions spécifiques de toutes les espèces dans le recouvrement végétal total durant les années d'études sont représentées en appendice F. Cependant nous avons constaté que la contribution spécifique (Csi) des espèces vivaces ; *Aristida pungens*, *Retama raetam* et *Astragalus armatus* entre l'année 2009 et 2015 a permis de conclure que seulement, la couverture d'*Astragalus armatus* ( $P = 0,04$ ) a augmenté significativement (figure 4.6).

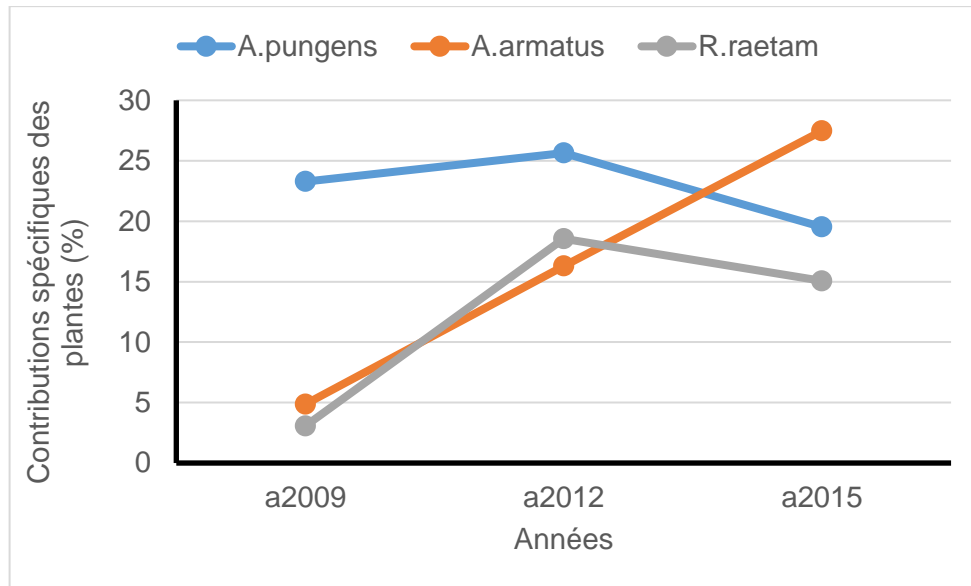


Figure 4.6 : Suivi de la prolifération des 3 espèces vivaces dans la zone de Mokrane.

#### 4.1.1.1 L'étude pastorale de la zone de Mokrane

La productivité enregistrée dans la zone d'étude a présenté une moyenne de 98.38 UF/an ; la valeur pastorale avec une moyenne de 12.4 % et la charge en ovin est de 1 ovin par 4 ha (tableau 4.4), l'indice de perturbation calculé indique que le milieu est perturbé.

Tableau 4.4 : Evaluation de la productivité pastorale et la charge pastorale de la zone de Mokrane comparée à ceux de (Nedjraoui [8])\* et URBT [153]\*\*

Parcours steppiques	Productivité pastorale (UF/an)	Valeur pastorale (%)	Charge pastorale (ha/U.ovine)	Indice de perturbation
Steppe à psammophile (à <i>A.pungens</i> , <i>R.raetam</i> , <i>A.armatus</i> ) (Nos résultats)	89-108	11-14	3.4- 4.5	0.66
Steppe à Alfa (*)	60-150	10-20	4 - 6	-
Steppe à Armoise	190**	24**	1-3*	-
Steppe à Remt (*)	25-50	6**	10-12	-
Steppe a sparte	100-190	25**	2-5	

La lecture du tableau 4.4, nous a permis de conclure que le parcours ensablé de Mokrane a présenté une valeur pastorale proche de celle de la steppe a Alfa , mieux que celle de Remt , et moins que celle de la steppe à armoise et à sparte.

L'étude pastorale de la zone de Mokrane au cours des six années d'étude a démontré une éventuelle stabilité pour tous les indices calculés (tableau 4.5), la diminution de la valeur pastorale en 2012 c'est répercuté sur la charge pastorale qui a augmenté à son tour, bien que le RV a augmenté, cette augmentation est due à la prolifération des espèces peut palatables, l'indice pastorale de chaque plante a été détaillé en appendice F.

Tableau 4.5 : Evolution de la productivité pastorale de la zone de Mokrane durant les années (2009 -2012 - 2015).

Année	2009	2012	2015
RV %	46,24	62.13	63,17
VP %	13,85	10.99	13,74
Pr (UF/an)	108,11	88.85	107,40
Charge pastorale (ha/ovin)	3,69	4.5	3,72

#### 4.1.2 La hauteur des sédiments Accumulés sous et hors canopée (végétation)

Sur les 1200 points de lecture des élévations notés par l'appareil topographique, nous démontrons dans la figure 4.7, que la fréquence des points occupés par du sable non fixé est la plus élevée, suivi de celles de *Sc. barbatus* et *A. pungens*

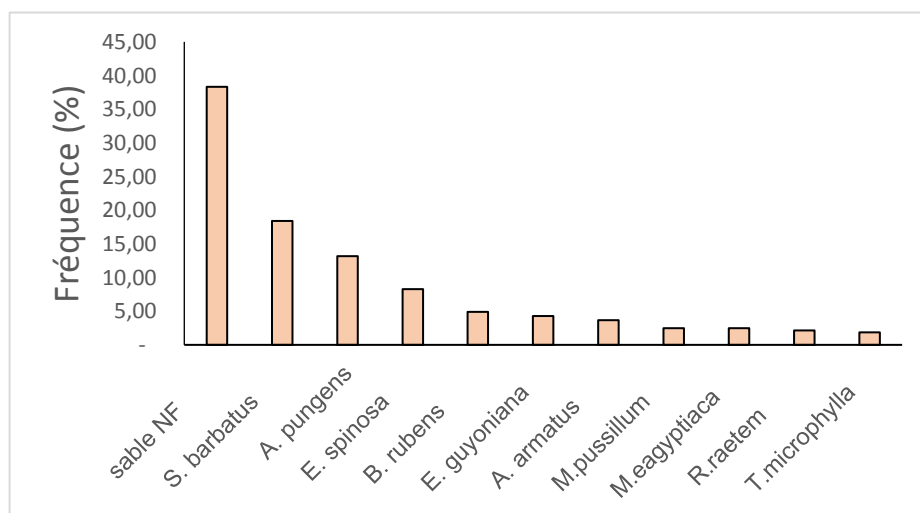


Figure 4.7 : Fréquence des sédiments accumulés fixés et non fixés dans la zone de Mokrane

Dans la zone de Mokrane, les hauteurs des sédiments accumulés n'ont pas dépassés un mètre (1 m). Plusieurs plantes ont été observées, positionnées à différentes hauteurs des sédiments accumulés (figure 4.8). Les plantes vivaces : *A. pungens*, *A. armatus* et *R. raetam* ont été observées positionnées sur les hauteurs inférieures entre (29 et 36 cm) que celles des sédiments non fixés par la végétation, ce que nous avons appelés sol non fixée, elles présentaient des valeurs entre 36 cm à 97 cm. Les espèces de plantes annuelles comme *M. aegyptiaca*, *B. rubens*, *E. guyoniana* ont été positionnées sur les crêtes des sédiments accumulés avec des valeurs de 51,6 cm à 63 cm. La différence entre ces élévations était statistiquement significative ( $F_{10, 325}=7.55$ ,  $P < 0.001$ ).

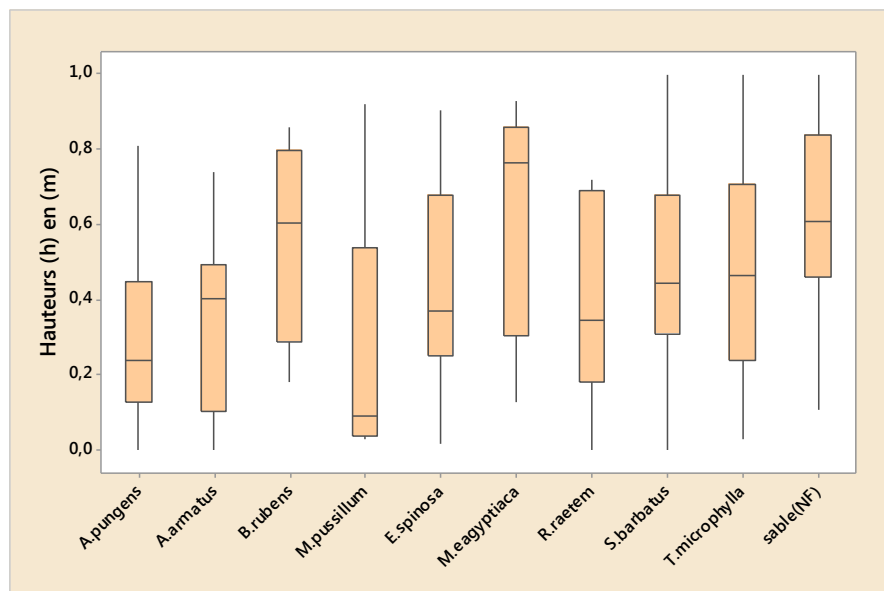


Figure 4.8 : Hauteur (m) des sédiments accumulés sous et hors végétation.  
(NF : non fixé)

Le test de Fisher a révélé des différences entre les hauteurs des sédiments accumulés liées à quelques plantes présentes dans la station étudiée. Nous avons enregistré que *A. pungens* n'a pas été observée à la même hauteur avec *E. spinosus*, *B. rubens*, *E. guyoniana*, *S. barbatus* et *M. aegyptiaca*. Par ailleurs la

hauteur des sédiments accumulés sous *A. armatus* a été différente de celle de *B. rubens* et *M. aegyptiaca*. La hauteur des sédiments sous *M. pusillum* a été différente que celle de *B. rubens*, *E. guyoniana* et *M. aegyptiaca*.

#### 4.1.3 Caractéristiques du sol sous et hors végétation (hors canopée)

##### 4.1.3.1 Granulométrie

Les sédiments accumulés sous et hors végétation ont été très riches en sable fin, avec un taux allant jusqu'à 50 % (figure 4.9), le taux le plus élevé, 64 %, a été enregistré pour *A. pungens*. Le sol non fixé a été le plus riche en sable grossier, un taux de 46 % a été observé ; Le sol sous *A. armatus* a enregistré le taux le plus bas en sable grossier (30 %). Le sol sous *Aristida pungens* n'a pas présenté des teneurs en limon et en argile, par ailleurs ces derniers ont présenté respectivement 9 % et 10 % sous *Astragalus armatus*.

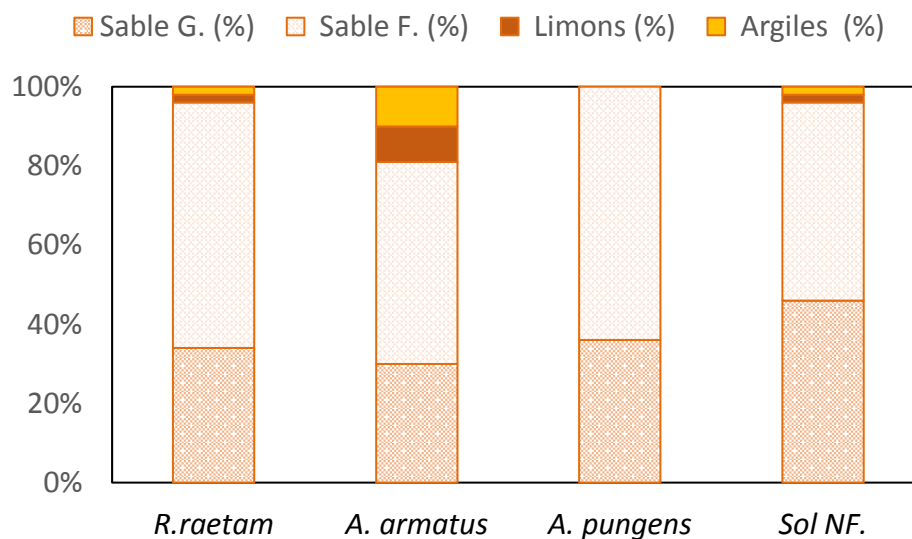


Figure 4.9 : Fractions des particules minérales des sédiments accumulés sous et hors canopée

La texture du sol non fixé et du sol fixé par *A. pungens* et *R. raetam* dans la zone de Mokrane est sableuse, par ailleurs celle de *Astragalus armatus* est une texture sableux-argileuse.

#### 4.1.3.2 Caractéristiques physiques

Dans le tableau 4.6, nous avons présenté les valeurs des paramètres physiques et physicochimiques du sol sous et hors végétation.

Concernant la teneur en eau, le sol de *R. raetam* a été le plus humide (2,39 %), alors que le sol non fixé (hors canopée) a présenté le plus faible taux d'humidité (1,06 %). L'analyse statistique a révélé une différence significative entre l'humidité du sol sous la canopée et le sol hors de la canopée ( $P = 0,01$ ), les valeurs du taux d'humidité du sol sous les trois plantes étudiées ont formé un seul groupe statistique.

Tableau 4.6 : Moyennes  $\pm$  écart-type des propriétés physiques et physicochimiques du sol sous et hors canopée

Paramètres du sol	Sous la canopée			Hors canopée	
	<i>R. raetam</i>	<i>A. armatus</i>	<i>A. pungens</i>	Sol N. fixé	<i>P</i> -value
Humidité %	2.39 <sup>a</sup> $\pm$ 0.48	1.89 <sup>a</sup> $\pm$ 0.86	2.24 <sup>a</sup> $\pm$ 0.48	1.06 <sup>b</sup> $\pm$ 0.64	0.01
pH	8.30 <sup>b</sup> $\pm$ 0.46	8.87 <sup>a</sup> $\pm$ 0.07	8.76 <sup>a</sup> $\pm$ 0.07	8.72 <sup>a</sup> $\pm$ 0.12	0.009
CE (ms/cm)	0.40 <sup>b</sup> $\pm$ 0.07	0.39 <sup>b</sup> $\pm$ 0.08	0.92 <sup>a</sup> $\pm$ 0.06	0.50 <sup>b</sup> $\pm$ 0.06	<0.001
C (%)	0.82 <sup>a</sup> $\pm$ 0.27	0.70 <sup>a</sup> $\pm$ 0.26	0.68 <sup>a</sup> $\pm$ 0.29	0.25 <sup>b</sup> $\pm$ 0.18	0.01
N (%)	0.08 <sup>a</sup> $\pm$ 0.01	0.06 <sup>ab</sup> $\pm$ 0.01	0.04 <sup>bc</sup> $\pm$ 0.01	0.02 <sup>c</sup> $\pm$ 0.01	0.005
CaCO <sub>3</sub> (%)	1.75 $\pm$ 0.89	1.55 $\pm$ 1.11	2.37 $\pm$ 0.89	1.96 $\pm$ 0.47	0.07
M.O (%)	1.42 <sup>a</sup> $\pm$ 0.48	1.21 <sup>a</sup> $\pm$ 0.45	1.16 <sup>a</sup> $\pm$ 0.51	0.43 <sup>b</sup> $\pm$ 0.32	0.001
C/N	8.57 $\pm$ 2.06	11.25 $\pm$ 4.17	14.54 $\pm$ 11.04	13.97 $\pm$ 4.93	0.66

Le sol non fixé et le sol fixé par *A. pungens* et *A. armatus* ont été plus alcalin avec un pH moyen dépassant 8,72, tandis que le sol de *R. raetam* a montré la moyenne la plus faible en pH (8,30).

Le sol sous *A. pungens* a montré la plus forte valeur de la CE avec une moyenne de 0,92 ms/cm. La moyenne la plus basse a été mesurée pour *A. armatus* proche de celle du sol sous *R. raetam*. Entre les valeurs extrêmes, le sol hors de la canopée (sol non fixé) a présenté une moyenne de conductivité électrique égale à 0,50 ms/cm. statistiquement, ANOVA a révélé une différence hautement significative ( $P < 0,001$ ) pour ce paramètre.

Les sols sous le couvert de *R. raetam* et *A. armatus* ont présenté les valeurs les plus élevées en azote dépassant 0,06 %. La valeur la plus basse de la teneur en N a été observée pour le sol non fixé par la végétation avec un taux moyen de 0,02 %. Le sol sous *A. pungens* a enregistré des teneurs intermédiaires en azote avec une moyenne de 0.04% en azote ( $P = 0.005$ ).

Les teneurs moyennes du carbone organique des sols sous canopée des trois plantes steppiques a été plus de 0.68%, ce taux est supérieur à celui du sol non fixé qui a présenté une moyenne de 0.25% en carbone organique.

La plus grande valeur en calcaire a été enregistrée pour le sol sous le couvert d'*A. pungens* avec un taux moyen de 2,37 %. En outre, le taux moyen le plus bas du calcaire a été enregistré dans le sol sous le couvert d'*A. armatus* avec un taux moyen de 1,55 %.

Le rapport C/N indique la vitesse de la décomposition de la matière organique dans le sol. La valeur la plus élevée a été enregistrée sous la canopée d'*A. pungens* avec une moyenne supérieur à 14, tandis que la valeur la plus basse du rapport C/N a été observée dans le sol sous le couvert de *R. raetam* avec une moyenne de 8.

#### 4.1.3.3 Caractéristiques microbiologiques

Des teneurs plus élevées en unités formant colonies bactériennes (UFC) ont été observées dans les sols associés aux espèces hôtes étudiées par rapport à celles enregistrées dans les sédiments non fixées (figure 4.10). Le sol sous le couvert des deux plantes de la famille des Fabacae (*R. raetam* et *A. armatus*) a été plus riche en bactéries avec respectivement ( $1,21 \times 10^5$  ufc/g,  $1,08 \times 10^5$  ufc/g) que sous la plante de la famille des poacae (*A. pungens*) qui a présenté une valeur



moyenne de  $0,35 \times 10^5$  ufc/g. Le sol non fixé a été le moins riche en bactéries avec une valeur moyenne de  $0,11 \times 10^5$  ufc/g. le test ANOVA a révélé une différence très hautement significative ( $P < 0,001$ ).

Dans le cas contraire, la teneur la plus élevée en champignons dans le sol a été observée dans le sol occupé par *A. pungens* avec une valeur moyenne de  $0,63 \times 10^5$  ufc/g suivie de celle du sol de *R. raetam* avec une valeur moyenne de  $0,46 \times 10^5$  ufc/g. Le sol sous *A. armatus* a montré une faible valeur, proche de celle du sol non fixé.

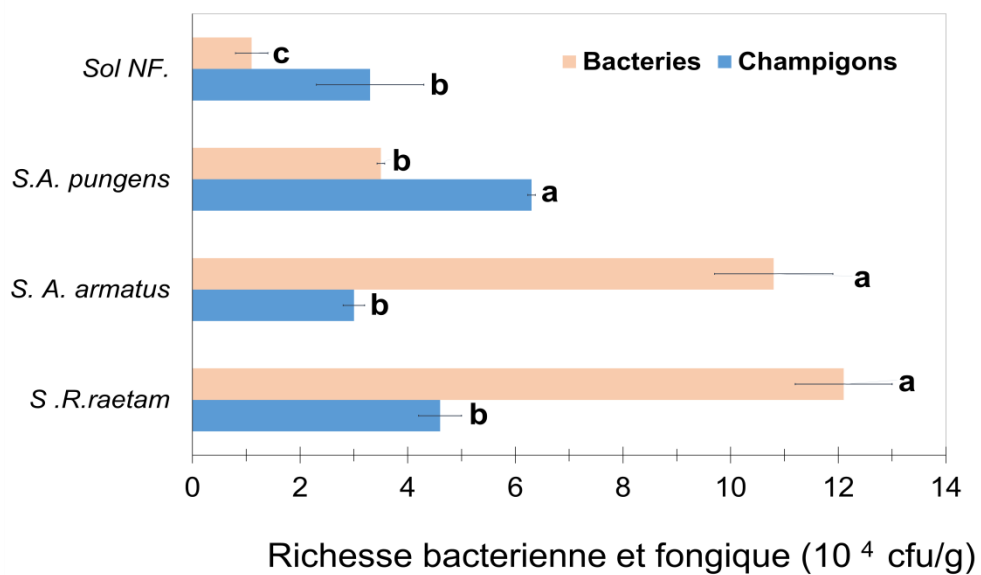


Figure 4.10 : Richesse microbienne de sédiments accumulés sous et hors de la canopée (NF.=non fixé, S.= sol)

## 4.2 Discussion

### 4.2.1 Végétation

Toutes les espèces végétales inventoriées dans la zone de Mokrane ont déjà été signalées par d'autres auteurs intéressés par la biodiversité végétale des steppes nord-africaine [154,16].

L'analyse floristique de Mokrane zone agricole ensablée, nous a permis de recenser la dominance de 7 plantes steppiques : *Bromus rubens*, *Schismus barbatus*, *Thymelaea microphylla*, *Echinops spinosus*, *Retama raetam*, *Aristida pungens* et *Astragalus armatus* (Appendice F). AIDOUD [142] a déjà confirmé la dominance des familles ; Asteraceae, Poaceae, Fabaceae et Chenopodiaceae dans la flore désertique. Des observations similaires ont été notées dans la description floristique de Sahara du Nord Algérien [155,156]. Les Astéracées, les Poacées et les Fabacées sont trois familles qui représentent 35 à 40% de la flore dans chaque secteur saharien [63, 157]. Cette prédominance est justifiée puisque ce sont des familles cosmopolites qui sont très répandues sur toute la steppe et l'Atlas saharien [158]. Sur les plans physiologique et floristique, DJEBAILI [159], définit la variation de la composition floristique du groupement en fonction de la nature du substrat lithologique. Lorsqu'il se développe sur glacis d'érosion fortement ensablé, ce groupement forme des faciès avec des espèces psammophytes telles que *Retama raetam* et *Thymelaea microphylla*. Selon BENARADJ *et al.* [158], l'ensablement favorise l'installation des espèces psammophytes telles que : *Retama raetam* et *Malcolmia aegyptiaca*.

POUGET [160] a indiqué que *Aristida pungens* et *Malcolmia aegyptiaca* sont constatées sur des micro dunes fixées. Par ailleurs les dunes non fixées sont colonisées par *saccocalyx saturoides* ; *Euphorbia guyoniana* , *Ononis natrix* , ce sont des espèces résistantes au manque d'eau et sont les mieux adapté à ce type d'écosystème. Selon QUEZEL [143], sur les dunes mobiles quelques espèces peuvent survivre sous 50 mm de pluviométrie comme *Euphorbia guyoniana* et *Aristida pungens*

KILLIAIN [161], a déjà indiqué qu'*Euphorbia guyoniana* dégage des racines à 15 cm de l'horizon humide. Les Therophytes comme *Bromus rubens* et *Lolium rigidum* demande un certain pourcentage d'eau. Pouget [55], a indiqué la présence de *Malcomia aegyptiaca*, *Aristida pungens* et *Retama reatam* dans la texture grossière des sols.

L'analyse de l'AFC, nous a permis de comprendre la structuration floristique de la zone d'étude, l'existence des plantes liées au micro dunes fixées (groupe1), les espèces liées au voiles sableux et au dunes non fixées (groupe 3) , les résultats obtenu par l'AFC nous ont permis de confirmer les déclarations des auteurs précités.

Les résultats de l'analyse du type biologique ont démontré la dominance des thérophytes dans le parcours de Mokrane. La thérophytisation observée est liée d'une part à la rudesse du climat et d'autre part aux actions anthropiques qui dégradent de plus en plus les conditions d'installation de nouvelles espèces. EMBERGER [162] et DAGET [163], affirment que le taux des thérophytes croît avec l'aridité du milieu. Cette richesse est due au processus de la "remontée biologique" de la reconstitution, la régénération et la réapparition des espèces menacées de destruction par les facteurs de dégradation. 30% de la végétation psammophytes est due à la prolifération des plantes éphémères [9]. Nous avons ainsi observé l'impact de la sécheresse climatique par l'augmentation du taux des thérophytes et par la présence des espèces d'affinité saharienne telles que : *Euphorbia guyoniana* et *Launaea residifolia*. Les chamæphytes également peuvent développer des formes d'adaptation à la sécheresse. La chamæphytisation enregistrée dans la zone de Mokrane a pour origine le phénomène d'aridité, selon FLORET et PONTANIER [154], les chamæphytes s'adaptent mieux à la sécheresse estivale. Le pâturage favorise aussi de manière globale les chamæphytes repoussées par les troupeaux comme *Thymelaea microphylla*, *Hammada scoparia*, *Anvillea radiata* et *Gymnocarpos decander* [164] et *Astragalus armatus* selon FLORET et PONTANIER [154]. Selon KADI HANIFI [164], le pâturage favorise de manière globale les chaméphytes refusés par les troupeaux. KADI HANIFI [165] a confirmé que la régression des formations steppiques se traduit généralement par une chamaephytisation par des espèces épineuses dépourvues d'intérêt économique

délaissées et repoussés par le bétail. LE HOUEROU [16] a signalé à son tour que l'augmentation des chamaephytes ligneuses dans les formations à Poacées fait suite au surpâturage par les ovins et les bovins. Dans notre zone d'étude, les parcours sont surtout exploités par les ovins et les caprins. Les résultats de l'AFC a fait ressortir l'influence du pâturage dans la zone de Mokrane par l'apparition du groupe à *A. armatus* (G2). les phanérophytes sont moins importants, ces derniers diminuent progressivement avec l'aridification du climat, La prolifération des hémicryptophytes peut s'expliquer aussi par la pauvreté du sol en matières organiques ce qui a été démontré par l'analyse du sol.

L'analyse du spectre phytogéographique a démontré la dominance de la tendance méditerranéenne, endémique et saharienne. Ces résultats viennent cependant confirmé les tendances observées à l'échelle de la sous-région d'Afrique du Nord par LE HOUEROU [16] qui a montré que parmi les 2630 espèces végétales vasculaires présentes dans les steppes maghrébines, 60 % sont des espèces d'affinité méditerranéenne et 30 % d'affinité tropicale. Le taux du spectre saharien élevé peut être expliqué par l'aridité du milieu.

Depuis l'année 2009 à l'année 2015, les indices écologiques (richesse totale, l'équitabilité et la diversité en espèces) n'ont pas montré une différence significative, le milieu a demeuré peu diversifié. L'augmentation du taux du recouvrement végétal dans le site est due à la fixation du sable par les plantes vivaces (appendice G), EI-BANA *et al.* [28] et GUERRACHE *et al.* [166], AKKOUICHE *et al.* [167] ont enregistré l'amélioration de la couverture végétale sur les dunes de sable fixées par *Retama raetam*. *L'Astragalus armatus* une chamaephyte à faible valeur pastorale a montré une prolifération remarquable dans le site, c'est une espèce qui apparait dans les zones anciennement cultivées et les zones surpâturées [154]. CHAIEB [83] a expliqué cette prolifération par l'architecture racinaire de cette plante, favorisant l'absorption d'eau et encore à son pouvoir germinative élevé. Les modifications floristiques des écosystèmes pastoraux des régions arides et désertiques, sous l'effet de la pression animale et du déficit hydrique, affectent en premier lieu les graminées et les chamaephytes palatables [168]. Le maintien de la productivité biologique du milieu demeure, dans de telles conditions, lié à l'apparition d'un nouveau type de végétation peu productif

mais en équilibre avec ce nouvel environnement [154]. Toutefois, bien qu'*Astragalus armatus* soit considérée comme étant une espèce marquant la dégradation, elle peut contribuer, ne serait-ce que de façon partielle, au processus de restauration de l'équilibre écologique dans ces milieux dégradés [83]. Le piégeage du sable et la reconstitution du voile éolien par les touffes très développées entraînent une amélioration du bilan hydrique du sol et favorisent la germination d'espèces jusqu'alors raréfiées. Enfin, son aptitude à fixer de l'azote atmosphérique contribue à améliorer la fertilité du sol.

Le parcours de Mokrane à Laghouat (parcours à Drinn) a présenté une valeur pastorale moyenne de 11% à 14%, nous avons estimé ce taux durant une période où la végétation était supposée optimale. Comparativement à HIRCHE et *al.* [145], ont donné une valeur de 7% pour un pâturage de la steppe Sud-Ouest algérien dans la région de Naâma. Dans la même région en 2007, BENARADJ et *al.* [158], ont calculé une valeur pastorale de 4 % pour un parcours à Sparte. Par contre les résultats, établis par OSS [169] sur les potentialités des parcours Ouest algériens rapportent une valeur pastorale plus élevée de l'ordre de 11%, valeur proche à nos résultats. Les différents types de végétation et les richesses dans ces parcours expliquent les écarts enregistrés entre les valeurs pastorales. Aussi bien que le couvert végétal lui-même est toujours dépendant des conditions locales édapho-climatiques qui diffèrent d'une région à l'autre et d'une année à l'autre. La valeur pastorale est un indice synthétique utilisée pour la caractérisation des capacités offertes par les parcours. Le parcours de Mokrane a présenté une valeur pastorale proche de la steppe graminéenne de l'alfa mais mieux que celle du sparte et du remt .

Dans notre cas la faiblesse de la valeur pastorale moyenne de Mokrane, peut être expliquée aussi par le faible taux de recouvrement de la surface du sol par la végétation, par la richesse faible de la flore qui caractérise le parcours et par la nature des espèces végétales présentes qui ne sont pas toutes palatables. Parmi les plantes inventoriées plus de 68 % des espèces ont des indices pastoraux spécifiques médiocres ( $\leq 2$ ) révélateurs de valeurs énergétiques faibles. Environ 16 % des espèces possèdent des qualités énergétiques moyennes avec des indices pastoraux spécifiques ( $3 < I_s < 5$ ), mais seulement 16% des plantes inventoriées

possèdent de bonnes qualités fourragères avec des indices spécifiques supérieurs à 5 (*Medicago laciniata*, *megastoma pussillum* et *Plantago albicans*) mais faiblement présentes dans le lieu. La faiblesse de la valeur pastorale peut aussi être due à la dominance du parcours des psammophytes notamment *Thymelaea microphylla*, *Aristida pungens*, *Retama raetam* et *Astragalus armatus* et qui présentent aussi des qualités fourragères (indices spécifiques) moyennes et médiocres.

Dans les steppes à psammophytes du sud Oranais, NEDJRAOUI [8], estima des productivités pastorales maximales entre 200 et 250 UF/ha, nos valeurs de (Mokrane) Laghouat sont variables entre 89 et 108 UF/ha, similaires à celles rapportées par SALEMKOUR et *al.* [170], pour d'autres pâturages dans la steppe à Laghouat. Toutefois la productivité du parcours à Laghouat révèle une faible valeur nutritionnelle de la végétation présente et la médiocrité de la zone au pâturage. Les écarts de la productivité entre les parcours de Laghouat et ceux de la steppe sud oranaise peuvent être expliqués par le type de la végétation qui domine, par la superficie qu'elle couvre, par la nature du sol des parcours et surtout par les précipitations dans les lieux [8]. En effet les quantités de pluies reçues sont prépondérants pour le développement des communautés végétales des steppes [171 ; 172 ; 169]. Les valeurs pastorales et les productivités estimées occasionnent pour le parcours des charges pastorales moyennes variables de 3 et 5 ha / Unité ovine. Cette valeur est proche de celles estimées durant la même période dans d'autres lieux de la steppe algérienne [8, 58, 170,173]. La charge estimée pour le parcours de Mokrane reflète de façon claire une situation de déséquilibre pastoral et un mauvais état de santé de ce pâturage à l'image de la steppe algérienne.

Le calcul de l'indice de perturbation (IP) a fluctué entre 0,74 et 0,66 durant les années d'étude, la zone de Mokrane semble perturbée. Les perturbations d'origine anthropique sont pour une large part responsable de l'état actuel des structures de végétation au Maghreb [174]. Le couvert végétal naturel y est soumis en permanence à un double impact, d'une part celui des sols (trop secs et légers) et du climat (faible précipitations) et d'une part celui des actions de l'homme et de ses animaux [175].

#### 4.2 .2 Hauteur des sédiments accumulés sous et hors de la canopée

Les résultats de l'analyse statistiques concernant la préférence de certaines plantes à certaines élévations des sédiments accumulés, nous a permis de conclure qu'il existe des différences marquantes pour cette distribution.

Les trois espèces vivaces *A. pungens*, *R. raetam* et *A. armatus* ont été installées à un niveau plus bas du sol que certaines plantes annuelles qui se sont développées sur les plus hauts sommets des accumulations sableuses. Les différences entre les niveaux de distributions des plantes inventoriées pourraient être dues aux modes de dispersion des graines, aux poids des graines, à la direction du vent, à la vitesse du vent et au phénomène de ruissellement par les eaux de pluie. BOCHET [26] a expliqué que la capacité de dissémination des semences varie fortement selon les espèces et est principalement liée aux caractéristiques de la semence. Dans notre cas, les graines sur et dans le sol peuvent être déplacés horizontalement vers de nouveaux emplacements par différents facteurs biotiques (animaux) ou des facteurs abiotiques (le vent, le ruissellement et la gravité). Le transport de semences par ruissellement dépend des caractéristiques du sol, de la pente et de la pluie. Les graines peuvent également être déplacées verticalement par les animaux, dans la direction opposée de la banque de graines du sol.

Le mouvement des sédiments peut aussi expliquer les différences des niveaux de positions des espèces végétales sur les sédiments accumulés et leurs dépôts dans la zone étudiée. L'aspect de la surface de Mokrane a été attribuée aux dépôts colluvionnaires et alluvionnaires du quaternaire [132], le phénomène semble se prolonger jusqu'à présent. HOUYOU et al. [33] ont observé deux phénomènes à Laghouat : l'ensablement et l'érosion selon la vitesse et la direction du vent dans la zone de Mokrane. Les tempêtes de sable à Laghouat ont causé le transport des semences et de leurs dépôts avec le sable. Une fois les graines déposées dans le sol, elles germent, puis les plantes croissent si les conditions sont favorables. S'il y a manque d'eau, les plantes annuelles (éphémères) disparaissent, par ailleurs les plantes vivaces persistent. Nos constatations ont été en accord avec ceux de CUSSEDDU et al. [176], qui ont signalé que sur les dunes côtières en Sardaigne, les communautés végétales sont organisées d'une façon hiérarchique avec les élévations de la dune. Ces derniers auteurs ont ajouté que, les températures

estivales élevées ont conduit à une dominance compétitive des plantes ligneuses dans le dos de la dune.

Dans notre cas bien que, *A. pungens*, *A. armatus* et *R. raetam* ont des architectures racinaires différentes ; elles ont fixé le sable à des hauteurs voisines, ne dépassent pas 50 cm. La dispersion de leurs graines est due successivement aux différents processus (vent, eau, animaux). Les plantes annuelles passent la mauvaise saison sous forme de graines et seront déplacées avec les sédiments de sable par le vent, sachant que dans la zone de Mokrane le vent souffle le long de l'année [33]. Les nouveaux dépôts de sable (50 cm à 97cm) contiendraient des graines de plantes annuelles, qui apparaîtront ensuite avec les premières pluies printanières. Ce comportement est différent de graines de plantes vivaces qui ont été étudiés ; ceux-ci exigent des conditions de germination spécifique en raison de leur dormance [177].

Cette méthode originale pour le calcul des élévations des dépôts éoliens fixés et non fixés , nous a permis de conclure que la zone de Mokrane est envahie par des dépôts qui ne dépassent pas 1mètre de hauteur, nous appelons donc les dépôts éolien dans cette zone, des micro dunes et non des nebkas, vu la succession observée.

#### 4.2.3 Caractéristiques du sol sous et hors de la canopée

Les résultats de l'analyse du sol de la zone de Mokrane ont démontré que le sol de Mokrane a présenté en général une texture sableuse, un pH alcalin, un faible taux d'humidité, d'azote, de matière organique, il a été peu à modérément calcaire, une faible salinité et une faible richesse microbienne, et ce selon les normes présenté en appendice H .

Nos résultats ont montré que les sols sous les couverts des végétaux ont présenté des teneurs plus élevées en humidité, en matière organique, en carbone, en azote et en richesse microbienne, que celles du sol hors de la canopée. Ceux-ci pourraient être en raison de la teneur en humidité plus élevée, qui stimule la croissance et l'activité des micro-organismes du sol selon les déclarations de HESP et MCLACHLAN [19].



La teneur élevée en humidité du sol mesurée sous la canopée à Laghouat pourrait être influencée par la baisse de la température, ce qui stimule également la décomposition des matières organiques. En fait, LOPEZ-PINTOR et *al.* [178] ont constaté que la végétation ligneuse fournit un microclimat moins stressant sur l'environnement en dessous le couvert, elle réduit les effets directs des forts rayonnements solaire et de la température, fournissant une plus grande disponibilité de l'eau et provoquant une accumulation de la matière organique et des nutriments. PYKE et ARCHER [179] ont indiqué que le sol sous la canopée des arbres pourrait maintenir une population plus élevée de bactéries, une conservation et une accumulation du carbone et d'azote. Les déclarations de ces derniers auteurs sont en accord avec nos résultats sous les plantes vivaces.

Le taux d'azote dans le sol sous le couvert des plantes vivaces peut s'expliquer par la présence d'arbustes fixateurs de l'azote atmosphérique comme *R. raetam* et *A. armatus*, les mêmes constatations ont été faites par MUÑOZ-VALLES et *al.* [180] en Espagne qui ont enregistré des teneurs élevées en carbone et en azote sous la canopée de *Retama monosperma*. De même, HALVORSON et *al.* [181] ont observé une teneur élevée en N dans le sol sous les arbustes désertiques aux Etats-Unis.

La végétation contribue également à une réduction de l'écoulement d'eau souterraine [182] et l'augmentation des nutriments dans le sol sous la canopée [29, 183, 28]. Entre les années 2009 et 2015, nous avons observé la formation d'une croûte microbienne sur la surface du sol de la zone étudiée. Il s'agit d'un facteur important pour conserver l'humidité du sol, plusieurs études a indiqué que l'existence de la croûte microbienne est nécessaire pour le développement des communautés végétales [184], elle affecte le régime des eaux en altérant les eaux de ruissellement [182 ,185] et en diminuant l'évaporation [186].

Les communautés microbiennes de la rhizosphère peuvent être stimulées ou inhibées par les composants d'exsudats racinaires [187]. Les racines de certaines plantes en se développant secrètent des rhizodépôts dont la fraction soluble est riche en polysaccharides qui permettent d'augmenter la cohésion des agrégats [114]. Nos résultats ont enregistré que les trois espèces vivaces réagissaient différemment pour la richesse microbienne au niveau du sol. Nous

avons constaté que le sol sous *A. pungens* contient plus de champignons que de bactéries par rapport aux sols sous *R. raetam* et *A. armatus*. Les champignons sont les plus efficace à améliorer la stabilité des agrégats à cause de leurs sécrétions à fort pouvoir collant [114]. Le processus de fixation de N<sub>2</sub> des deux plantes Fabaceae, impliquant un nombre variable de bactéries fixatrices d'azote atmosphérique sur les racines[82,188]

Nos résultats ont montré que la texture du sol, plus précisément des sédiments accumulés sous les plantes étudiées a été différente que celle des accumulations sédimentaires non fixées, le sol sous la canopée a présenté des taux plus élevés de particules fines (limon et argile). El-BANA et al. [28] ont signalé qu'il y avait des différences significatives dans la texture du sol des nebkas fixées par *Retama raetam*, la proportion des particules les plus fines du sol était supérieure sous le couvert que celui du sol entre nebkas.

L'analyse en composantes principales (ACP, figure 4.11) a permis une meilleure visualisation du comportement du sol en présence de la végétation et une étude de la relation entre les variables édaphiques. Le premier axe F1 a été en corrélation positive avec les teneurs de N , C , les bactéries et l'humidité, cette variabilité a été liée à la présence de *R. raetam* ( $r = 0,66$  ). L'axe F1 a été corrélé négativement avec la teneur en sable grossier, le rapport C/N et la hauteur des sédiments accumulés, cette variabilité a été liée à l'absence de la végétation sur le sol non fixé ( $r = 0,87$ ). Le deuxième axe (F2) a été corrélé positivement avec le contenu en champignon, le pourcentage du sable fin, la teneur en CaCO<sub>3</sub> et la CE du sol , cette variabilité a été liée à la présence d'*A. pungens* ( $r = 0,86$ ). Le côté négatif de l'axe F2 a été corrélé avec les teneurs en limon et en argile, cette variabilité a été liée à la présence d'*A. armatus* ( $r = 0,56$ ). Ceci pourrait expliquer aussi la structuration du milieu lors des répartitions des groupements végétaux que nous avons démontré en analyse factorielle des correspondances (AFC).

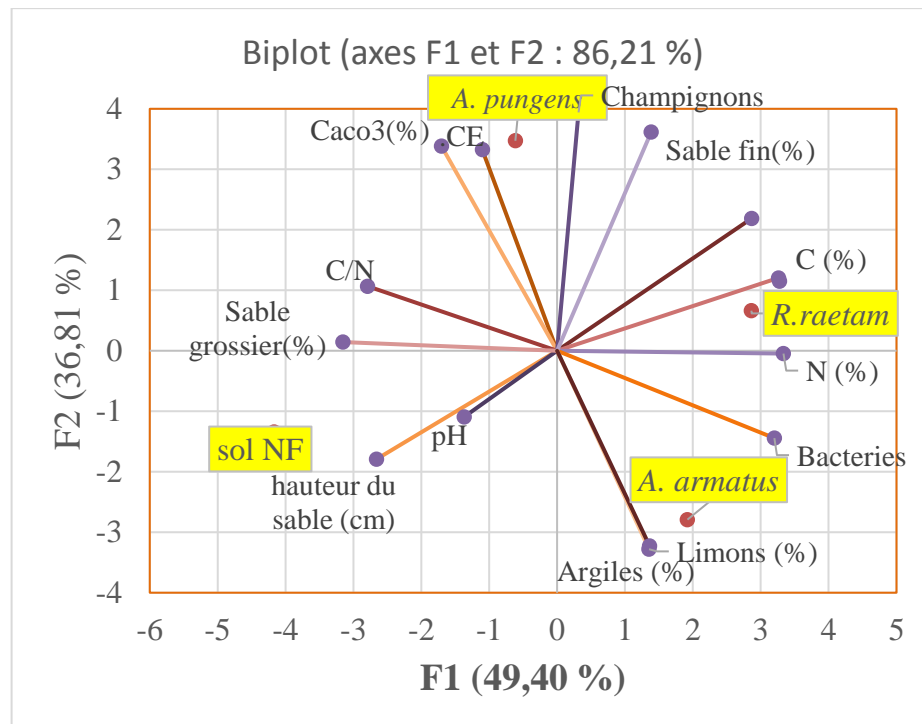


Figure 4.11. Les deux premiers axes d'ACP montrant la relation entre les caractéristiques du sol et les plantes

Chaque plante a réagi différemment : *R. raetam* a donné plus d'informations pour le taux d'azote, le carbone et la richesse bactérienne. Selon EI-BANA et al. [189], la nebkha de *R. raetam* peut améliorer la richesse floristique dans les zones où le sol est soumis à une déflation sévère. Les branches de *R. raetam* sont efficaces pour capturer et retenir le sol [28]. DANIN [190] a signalé que cet arbuste de *R. raetam* pourrait survivre dans des cycles de déflation de sable. Nos résultats ont été similaires à ceux de SARIG et al. [188] qui ont expliqué que les ligneux Fabaceae fixateurs de  $N_2$ , tels que *R. raetam* pourrait améliorer la teneur en éléments nutritifs et la structure du sol par l'ajout d'azote et de la matière organique dans le sol à cause d'une litière tombante, et grâce aux associations symbiotiques au niveau des racines avec les bactéries rhizobiennes et avec les champignons mycorhiziens.

A travers notre étude nous avons ajouté des effets similaires d'*A. armatus*, qui a présenté des caractéristiques proches de celles du *R. raetam*.

Dans ce travail, seules trois espèces *Retama raetam*, *Aristida pungens* et *Astragalus armatus* ont été considérées comme plantes hôtes. Si les deux premières sont connues au Maghreb comme vrai psammophiles, la dernière est moins connue comme plante psammophile. LE HOUEROU [16] a indiqué la présence d'*A. armatus* dans des lieux à argile, Marne ou à gypse. *A. armatus* est également connu comme plante indicatrice de dégradation [191]. Selon nos résultats, il semble normal que les valeurs de limon et d'argile enregistrées sous le couvert d'*A. armatus* à Laghouat ont été plus élevées ; C'est peut-être un héritage environnemental sur les dépôts d'alluvions et de colluvions dans la zone de Mokrane.

Par ailleurs *Aristida pungens* peut être considéré comme « facilitateur » (sensu CONNELL et SLATYER [192]) plutôt que d'initiateur de la nebka. Ce rôle a déjà été décrit en Tunisie [18] pour *A. pungens* qui régresse et disparaît une fois la fixation de sable est terminée. Nos résultats ont démontré que *A. pungens* a présenté un effet bien marqué dans la capture des sables fins, Les exsudats racinaires de cette plante attirent les champignons plus que les deux autres plantes étudiées.

## CONCLUSION

A travers cette étude, nous avons pu démontrer l'action conjugué de deux facteurs ; l'ensablement et l'agriculture (labours et surpâturage) sur la diversité floristique des milieux steppiques fragiles. Malgré la faible diversité des espèces palatables, la prolifération et l'adaptation des espèces rejetées par les ovins et des espèces liées à la présence de sable, le milieu a connu une amélioration de point de vue fixation de sable et lutte contre l'érosion éolienne .

Nos résultats ont été nombreux, nous avons enregistré une certaine diversité et une richesse faible en espèces. Après 6 années de suivi, nous avons constaté une stabilité pour les indices écologiques, le taux du sable a diminué par rapport au recouvrement végétal.

La végétation naturellement présente dans le parcours de Mokrane est certainement liée aux conditions du milieu dans lequel ces espèces se trouvent, notamment la nature du sol et les précipitations annuellement reçues. Le taux de recouvrement par la végétation psammophile a été environ le tiers de la surface du sol du parcours, la couverture en sables mobiles a été élevée en an 2009, ce taux a régressé progressivement vers l'an 2015, ceci a montré une fixation du sable qui s'est produite naturellement par la végétation naturelle du site étudié. Les groupements des espèces identifiées dans le parcours de Mokrane ont présenté aussi des indices d'équitabilité élevés, reflétant leur équilibre dans le milieu où elles vivent. L'adaptation à la sécheresse et au sol sableux des espèces inventoriées permet donc leur développement ainsi que leur reproduction.

La majeure partie des espèces inventoriées n'était pas palatable (fourragère) ce qui s'est traduit par la faible charge ovine que pourrait supporter le parcours de Mokrane.

Les travaux qui ont porté sur les études de la steppe Algérienne ont été nombreux, ont fait ressortir le caractère dégradé de cet espace qui joue un rôle fondamental dans le système de production agricole du pays. A cela s'ajoute donc le parcours de Mokrane qui a présenté un des caractères de l'ensemble de la steppe algérienne. Les services agricoles de la ville de Laghouat ont distribué des terres dans le cadre des projets de la concession agricole, cette distribution n'a pas été bien étudiée car le site de Mokrane est une zone fragile où les flux éoliens et les vents de sable sont fréquents.

La hauteur du sable fixé par les espèces végétales a été plus basse que la hauteur du sable non fixé. Nous avons aussi enregistré par notre méthode nouvelle et originale, une préférence des espèces à certaines élévations de la micro dune. La méthode topographique utilisée et les résultats que nous avons obtenus pourraient servir aux géomorphologues pour savoir l'historique et la succession de la formation des micros dunes ainsi que le mouvement du sable d'une année à une autre.

L'analyse en composantes principales (ACP) a permis de présenter, les caractéristiques du sol des micros dunes, relatives à 3 espèces pérennes dominantes ; (*Retama raetam*, *Aristida pungens* et *Astragalus armatus*) comparés au sol dunaire hors végétation (non fixé). L'espèce *Retamaraetam* a donné plus d'information sur le taux de l'azote, du carbone et de la richesse bactérienne du sol ; *l'Aristidapungens* a été plus corrélé par la richesse fongique, la CE et le  $\text{CaCO}_3$  ; *l'Astragalusarmatus* a été plus corrélé par les limons et l'argile. Ces résultats ont permis de conclure les effets complémentaires des plantes à reconstituer l'équilibre d'un milieu.

Cette étude nous a permis de recenser les plantes steppiques pouvant coloniser les zones ensablées et sujets aux tempêtes des vents de sable violents dans la wilaya de Laghouat. L'action des labours et du surpâturage dans de telles zones fragiles ont abouti à l'apparition de quelques plantes à faibles valeurs pastorales tel *qu'Astragalusarmatus*, cette plante qui a été souvent connue comme espèce marquant la dégradation des parcours steppiques, par ailleurs nos résultats ont montré l'utilité de cette plante à améliorer les caractéristiques du sol dunaire.

Enfin, en perspectives : l'utilisation d'une mixture de plantes endémiques garantie un équilibre écologique d'un milieu menacé par les vents de sables et donnera de bon résultats dans la réhabilitation des parcours dégradés et désertifiés, lors des opérations de control de l'érosion éolienne en Algérie et en Afrique du nord.

Afin de mieux comprendre le comportement de ces plantes sur ce type de parcours, il serait nécessaire d'étudier la capacité germinative et le mode de dissémination de ses graines ; ceci permettra de comprendre aussi la faible prolifération de quelques-unes et la grande prolifération de certaines, tel que *Astragalus armatus*, ce qui a été réalisé dans des travaux non publiés et qui mériteraient d'être confirmés.

La texture du sol sous *Astragalus armatus*, nous a permis de réaliser des travaux sur la préférence de cette plante aux sols à texture fine, des études dans ce thème, seraient utiles dans d'autres zones .

La fixation de dune a fait objet de nombreux travaux, tel que la plantation de plantes exogènes, ce qui peut favoriser l'apparition des plantes invasives et nuire à l'équilibre des milieux, et ce à long terme, notre étude pourrait être utile dans les projets de plantations pastorales en utilisant des plantes endogènes.

De nombreuses études ont toujours reproché à l'agriculture en milieux arides, d'être destructive des milieux, il semble par le biais de cette étude que rien ne se perd dans la nature, les particules défrichées et les éléments minéraux perdus par les labours pourraient être récupérés grâce à une végétation adaptée aux milieux arides.

Enfin, la distribution des terres agricoles, dans le cadre des projets de réhabilitation des sols, devrait être bien réfléchi, surtout en zones fragiles conjuguées avec les effets des changements climatiques. La réflexion devrait être orientée vers la valorisation des parcours steppiques par la production des plantes médicinales et pastorales.

## APPENDICE A

### LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

- APFA : accès à la propriété foncière agricole (APFA).
- CDF : Conservation des forêts
- CILSS: Le Comité inter-États de lutte contre la sécheresse au Sahel
- CSFD: Comité Scientifique Français de la Désertification
- DSA : Direction des services agricoles
- FAO: Food and Agriculture Organization the United Nations
- GIZ: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit
- H% : pourcentage d' humidité
- HCDS : haut-commissariat du développement de la steppe
- IAP : institut algérien du pétrole
- M.ha : million d'hectare
- m/s : mètre par seconde
- ONM : office national de la météo
- ONS. Office national de statistique
- OSS : observatoire du Sahara et du sahel
- P(mm) : précipitation en millimètre
- R.G.P.H. recensement global de la population et de l'habitat
- RV : recouvrement végétal
- ROSELT : réseau d'observatoires de surveillance écologique à long terme
- T/ha : tonne par hectare
- T°(C) : température en degré Celsius
- UF/ ha : unité fourragère par hectare
- UF/ha : unité fourragère par hectare
- UFC/g : unité formant colonie par gramme de sol
- UNEP : United nations environment program
- URBT : Unité de Recherche sur les Ressources Biologiques Terrestres
- USDA-NRCS : United States Department of Agriculture -Natural Resources Conservation Service
- USGS : United States Geological Survey



## APPENDICE B

Tableau S 1. Cordonnées de localisation des 12 relevés linaires

Relevé		N 33°48'	E 2°48'	direction
T1	début	047	466	110°
	fin	043	477	
T2	début	048	467	110°
	fin	045	480	
T3	début	053	466	115°
	fin	052	474	
T4	début	044	510	95°
	fin	040	519	
T5	début	072	556	120°
	fin	073	564	
T6	début	087	556	140°
	fin	083	563	
T7	début	055	505	110°
	fin	049	509	
T8	début	010	505	115°
	fin	001	513	
T9	début	147	508	115°
	fin	140	526	
T10	début	151	515	110°
	fin	147	529	
T11	début	161	521	110°
	fin	156	538	
T12	début	084	565	115°
	fin	082	574	

## APPENDICE C

Physionomie de la végétation dans la zone de Mokrane en année 2009



Haut : *G/ Aristida pungens* et *Retama raetam*, Milieu : *G/ Astragalus armatus* ;  
Bas : *G/ Eupheurbia guyoniana* et *Malcomia aegyptiaca*

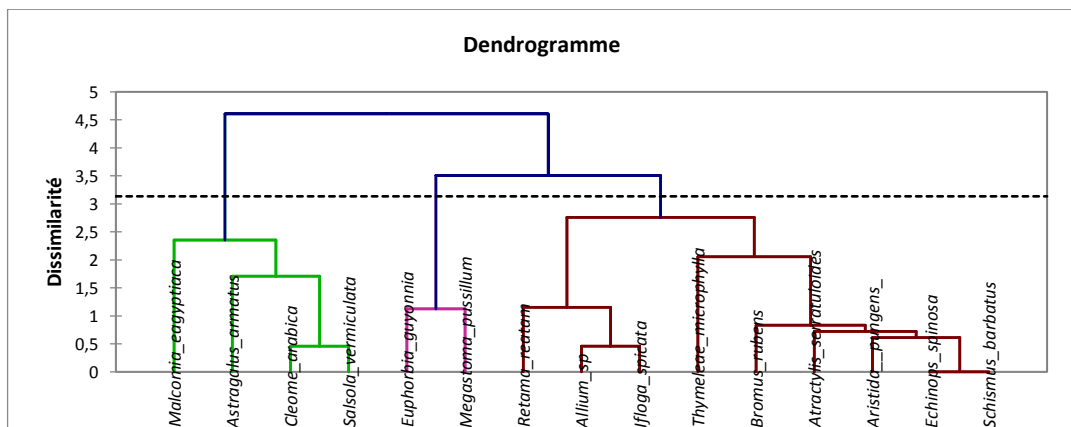
## APPENDICE D

### RESULTATS DE L' AFC ET DE CHA

a) Tableau S2. Coordonnées des observations sur les axes de l'AFC:

Observation	F1	F2	F3
<i>Allium_sp</i>	<b>-1,2089</b>	0,1072	0,2236
<i>Aristida_pungens_</i>	<b>1,3743</b>	-0,3960	0,1183
<i>Astragalus_armatus</i>	0,0288	<b>2,3682</b>	0,6654
<i>Atractylis_serratuloides</i>	<b>-1,1354</b>	-0,3592	-0,3637
<i>Bromus_rubens</i>	<b>1,3283</b>	-0,4256	-0,5861
<i>Cleome_arabica</i>	<b>-1,0700</b>	0,5970	-0,5887
<i>Echinops_spinosa</i>	<b>1,4369</b>	0,2250	0,1541
<i>Euphorbia_guyoniana</i>	-0,6319	-0,9893	<b>-1,6944</b>
<i>Ifloga_spicata</i>	-0,8853	-0,3475	<b>1,2628</b>
<i>Malcomia_eagyptiaca</i>	0,7540	0,6239	<b>-1,5336</b>
<i>Retama_reatam</i>	-0,4297	-0,6875	<b>1,1765</b>
<i>Salsola_vermiculata</i>	-1,0074	<b>1,2180</b>	-0,5528
<i>Schismus_barbatus</i>	<b>1,4369</b>	0,2250	0,1541
<i>Thymeleae_microphylla</i>	0,0749	-0,1651	<b>2,2768</b>
<i>Megastoma_pussillum</i>	-0,0656	<b>-1,9942</b>	-0,7124

b) Dendrogramme de CHA délimitant les groupes végétaux en fonction de la dissimilaire euclidienne ; entre 3 groupes distincts.



## APPENDICE E

TABLEAU S 2 : TEST DE BOOTSTRAP ( P ≤ 5 %) COMPARANT LA DIVERSITE ENTRE LES ANNEES

	<b>année_2009</b>	<b>année_2010</b>	<b>Boot p(eq)</b>
Taxa S	15	16	0,793
Dominance	0,2805	0,2639	0,635
Shannon H	1,848	2,097	0,103
Simpson indx	0,7195	0,7361	0,635
Equitability J	0,6825	0,7565	0,14
	<b>année_2010</b>	<b>Année_2011</b>	<b>Boot p(eq)</b>
Taxa S	16	19	0,254
Dominance	0,2639	0,237	0,593
Shannon H	2,097	2,235	0,446
Simpson indx	0,7361	0,763	0,593
Equitability J	0,7565	0,7591	0,964
	<b>Année_2011</b>	<b>année_2012</b>	<b>Boot p(eq)</b>
Taxa S	19	19	1
Dominance	0,237	0,1864	0,144
Shannon H	2,235	2,227	0,968
Simpson indx	0,763	0,8136	0,144
Equitability J	0,7591	0,7564	0,954
	<b>année_2012</b>	<b>Année_2014</b>	<b>Boot p(eq)</b>
Taxa S	19	21	0,425
Dominance	0,1864	0,1301	0,021*
Shannon H	2,227	2,96	0,001**
Simpson indx	0,8136	0,8699	0,021*
Equitability J	0,7564	0,9722	0,001**
	<b>Année_2014</b>	<b>Année_2015</b>	<b>Boot p(eq)</b>
Taxa S	21	18	0,204
Dominance	0,1301	0,1952	0,008**
Shannon H	2,96	2,238	0,001**
Simpson indx	0,8699	0,8048	0,008**
Equitability J	0,9722	0,7743	0,001**
	<b>année 2009</b>	<b>année 2012</b>	<b>Boot p(eq)</b>
Taxa S	15	19	0,057*
Dominance	0,2805	0,1864	0,001**
Shannon H	1,848	2,227	0,006**
Simpson indx	0,7195	0,8136	0,001**
Equitability J	0,6825	0,7564	0,081**

\*, différence significative ; \*\* hautement significative

## APPENDICE F

**TABLEAU S3 : DES CONTRIBUTIONS SPECIFIQUES DES ESPECES (2009-2015) ET INDICES DES VALEURS PASTORALES (IS)**

Espèce végétale (CS %)	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	IS
<i>Aristida pungens</i> Desf.	23,29	39,84	37,99	25,64		13,47	19,52	1
<i>Astragalus armatus</i> Willd.	4,87	17,80	16,13	16,29		15,39	27,47	1
<i>Atractylis serratuloides</i>	0,36	0,00	0,00	0,60		2,89	0,00	2
<i>Bromus rubens</i> L.	8,12	9,29	12,09	14,93		11,90	12,41	4
<i>Cleome arabica</i> L.	0,18	0,31	1,62	3,17		1,92	0,69	4
<i>Echinops spinosa</i> L.	8,48	6,30	4,66	7,09		3,85	0,27	0
<i>Erodium glaucophyllum</i>	0,00	3,78	3,39	0,00		4,81	0,00	1
<i>Eruca vesicaria</i> (L)Thell.	0,00	0,00	0,00	0,00		1,92	7,95	2
<i>Euphorbia guyoniana</i> Boiss & Rent.	1,99	1,57	0,34	2,71		6,73	0,41	0
<i>Evax desertorum</i> Pomel.	0,00	0,79	1,39	0,00		0,96	0,00	1
<i>Helianthemum getulum</i> Pomel.	0,00	0,94	1,39	0,15		0,00	0,00	2
<i>Ifloga spicata</i> Vahl.	0,36	6,77	1,04	1,06		10,58	0,97	0
<i>Launaea resedifolia</i>	0,30	0,47	0,69	0,45		0,77	2,09	4
<i>Malcomia aegyptiaca</i>	3,43	0,00	3,00	3,32		2,89	1,25	1
<i>Megastoma pusillum</i> Coss. & Durieu	1,44	0,00	1,50	0,00		0,80	0,69	8
<i>Medicago laciniata</i> L.	0,00	1,89	0,00	1,30		0,00	3,49	3
<i>Ononis pusilla</i> L.	0,00	0,00	0,42	0,40		0,00	0,42	2
<i>Peganum harmala</i> L.	0,00	0,00	0,00	0,00		0,96	0,00	0
<i>Plantago albicans</i> L.	0,00	1,73	1,90	0,15		1,92	1,39	7
<i>Retama raetam</i> Forssk.	3,07	5,67	4,78	18,55		7,70	15,06	2
<i>Salsola vermiculata</i> L.	1,08	1,73	0,60	0,00		0,96	0,00	6
<i>Schismus barbatus</i>	41,76	0,00	1,50	0,60		0,00	3,34	5
<i>Silene arenarioides</i> Desf.	0,00	0,00	0,00	0,30		1,89	0,88	1
<i>Stipa tenacissima</i> L.	0,00	0,00	0,00	1,32		0,96	0,00	1
<i>Thymelaea microphylla</i>	1,26	1,10	5,57	1,96		6,73	1,70	1

## APPENDICE G

### RECOUVREMENT DE LA VEGETATION DE LA ZONE DE MOKRANE, ANNEE 2015



Haut : la couverture végétale a augmenté, bas : photo démontrant la disparition de espèces après avoir fixé le sable, une fois le sable envahit la canopée, elle disparaît laissant un sol fixé (cas de *Aristida pungens*, et *Astragalus armatus*)

## APPENDICE H

TABLEAU S4. NORMES D'INTERPRETATION DE L'ANALYSE DU  
SOL

Paramètre	Nos résultats	normes	Interprétation	référence
CE ms/cm	0.39-0.92	$0.6 < C.E \leq 2$	Sol non à peu salé	Aubert, 1978
Humidité %	1.06-2.39	5% sol sableux	-	Soltner, 2014
pH	8.30-8.87	>8.7	Alcalin à très alcalin	(Shakar et Haidar, 2005)
Carbone %	0.25-0.83	-	-	-
Matière organique%	0.43-1.42	0,5 à 1,5% $\leq 0,5$	Pauvre en MO Très pauvre	Morand, 2001
Azote%	0.02-0.08	0.05 - 0.1	Très Pauvre à pauvre	Henin, 1969
C/N	9-15	10-15	Bonne à moyenne décomposition	Soltner, 2014
Calcaire total	1.55-2.37	1-5	Peu à modérément calcaire	Baize, 2000
Bactéries(ufc/g)	11000-121000	670.000.000	-	Soltner, 2014
Champignon(germe/g)	25000-63000		-	Soltner, 2014

Sources synthétisé de [148, 150]

## REFERENCES

1. Réquier-Desjardins, M., Jauffret, S. et Ben Khatra, N., "Lutter contre la désertification", *MediTERRA*,(2009),137-182 .
2. Dregne, H.E., " Combatting desertification: evaluation of progress", *Environmental conservation*, V. 11, n°2,(1984) , 138 p.
3. Oussedik, A., Iftène, T. et Zegrar, A., " Réalisation par télédétection de la carte d'Algérie de sensibilité à la désertification, *Science et changements planétaires*" *Sécheresse*, V.14, n°3,(2003), 195-201.
4. Franchis, L. et Ibanez, F., Les menaces sur les sols dans les pays méditerranéens, Plan Bleu, cahier 2,(2003),80p
5. Ghazi, A., et Lahouati, R., Algérie 2010, sols et Ressources biologiques. Doc. I.N.E.S.G., Alger, (1997), 38 p.
6. Khaldi, A., "La gestion non-durable de la steppe algérienne", *VertigO* 15152 ; (sept 2014),16p.
7. Nedjraoui, D., "Évaluation des ressources pastorales des régions steppiques algériennes et définition des indicateurs de dégradation" Doc. URBT, Alger (2004), 239-243.
8. Nedjraoui, D., Teneurs en éléments biogènes et valeurs énergétiques dans trois principaux faciès de végétation dans les Hautes Plaines steppiques de la wilaya de Saida. Th.Doc. USTHB, (1981), 156p
9. Amaouche, Id., *Les potentialités agro-pastorales de la steppe algérienne, rapport Cellule SIG et télédétection*, HCDS. MADR, Alger, (2011), 61p.
10. Hatimi, A., "Symbiotes racinaires de trois légumineuses arborescentes de dunes littorales de Souss Massa", Ed. INRA, Paris, *Les Colloques*, 77, (1995), 183-190.



11. Biielders, CL., Rajot, J-L. et Amadou, M., "Transport of soil and nutrients by wind in bush fallow land and traditionally managed cultivated fields in the Sahel", *Geoderma* , 109, (2002), 19–39.
12. Labiadh, M., Bergametti, G., Kardous, M., Perrier, S., Grand, N., Attoui, B., Sekrafi, S. and Marticorena, B., "Soil erosion by wind over tilled surfaces in South Tunisia", *Geoderma*, 202-203, (2013), 8–17.
13. Ikazaki, K., Shinjo, H., Tanaka, U., Tobita, S., Funakawa, S., Iwai, K. et Kosaki, T., "Soil and nutrient loss from a cultivated field during wind erosion events in the Sahel, West Africa", *Pedologist*, 55, (2012), 355–363
14. Langford, R.P., " Nabkha (coppice dune) fields of south-central New Mexico, USA." *Journal of Arid Environments*, 46, (2000), 25–41.
15. Parsons, A.J., Wainwright, J., Schlesinger, W.H., Abrahams, A.D. , "The role of overland flow in sediment and nitrogen budgets of mesquite dune fields, southern New Mexico", *Journal of Arid Environments* 53, (2003), 61-71.
16. Le Houérou, H.N., "Bioclimatologie et biogéographie des steppes arides du Nord de l'Afrique" *Options Méditerranéennes*, V.B, n° 10, (1995), 1-396
17. Nedjraoui, D., et Bédrani, S., " La désertification dans les steppes algériennes : causes, impacts et actions de lutte", *VertigO*, V. 8, n°1, (avril 2008), 1-15.
18. Bendali, F., Floret, C., Le Floc'h, E. and Pontanier, R., " The dynamics of vegetation and sand mobility in arid regions of Tunisia. *Journal of Arid Environments*, V.18, (1990), 21–32.
19. Hesp, P., McLachlan, A., " Morphology, dynamics, ecology and fauna of *Arctotheca populifolia* and *Gazania rigens nabkha* dunes", *Journal of Arid Environments*, V. 44, (2000), 155–172.
20. Bishop, SR., Momiji, H., Carretero-Gonzalez, R. and Warren, A."Modeling desert dune fields based on discrete dynamics", *DISCRETE DYN NAT SOC.*, V.7, (2002), 7–17.
21. Wanga, B., Wanga, X.T., Donga, Z., Liuc, B.X., Qiana, G., "Nebka Development and its Significance to Wind Erosion and Land Degradation in Semi-arid Northern China", *Journal of Arid Environments* , V. 65, (2006), 129-141.

22. Burri, K., Gromke, C., Lehning, M. and Graf, F. "Aeolian sediment transport over vegetation canopies: A wind tunnel study with live plants" *Aeolian Research*, V. 3, (2011), 205–213
23. Erktan, A., Cécillon, L., Roose, E., Frascaria-Lacoste, N. and Rey, F., "Morphological diversity of plant barriers does not increase sediment retention in eroded marly gullies under ecological rehabilitation (Southern Alps, France)", *Plant and Soil*, V. 370, (2013), 653–669.
24. Barchyn, T.E., Hugenholtz, C.H., "Aeolian dune field geomorphology modulates the stabilisation rate imposed by climate", *Journal of Geophysical Research*, V.117, (2012). F02035. doi.org/10.1029 / 2011JF002274, 16p.
25. Ola, A., Dodd, I.C., Quinton, J.N., "Can we manipulate root system architecture to control soil erosion?", *Soil*, V.1, (2015), 603–612.
26. Bochet, E., "The fate of seeds in the soil: a review of the influence of overland flow on seed removal and its consequences for the vegetation of arid and semiarid patchy ecosystems", *Soil*, V.1, (2015), 131–146.
27. Dougill, A.J., Thomas, A.D., "Nebkha dunes in the Molopo Basin, South Africa and Botswana: formation controls and their validity as indicators of soil degradation", *Journal of Arid Environments*, V. 50, (2002), 413-428.
28. El-Bana, M.I., Nijs, I., Khedr, A.A., "The importance of phytogenic mounds (Nebkhas) for restoration of arid degraded rangelands in Northern Sinai", *RESTOR ECOL*, V. 11, (2003), 317-324.
29. Danin, A., "Plant adaptations in desert dunes", *Journal of Arid Environments*, V. 21, (1991), 193–212.
30. Zarnetske, P.L., Hacker, S.D., Seabloom, E.W., Ruggiero, P., Killian, J.R., Madduz, T.B., Cox, D., "Biophysical feedback mediates effects of invasive grasses on coastal dune shape", *Ecology*, V. 93, (2012), 1439–1450.
31. Durán, O., Silva, M.V.N., Bezerra, L.J.C., Herrmann, H.J. and Maia, L.P., "Measurements and numerical simulations of the degree of activity and vegetation cover on parabolic dunes in north-eastern Brazil". *Geomorphology*, V.102, (2008), 460–471.
32. Burylo, M., Rey, F., Mathys, T. and Dutoit, N., "Plant root traits affecting the resistance of soils to concentrated flow erosion", *EARTH SURF PROC LAND*, V. 37, (2012), 1436–1470.

33. Houyou, Z., Biolders, C. L., Benhorma, H. A., Dellal, A. and Boutemdjet, A., "Evidence of strong land degradation by wind erosion as a result of rainfed cropping in the Algerian steppe: a case study at Laghouat" *Land Degrad. Dev.*, V.27, (2014), 1788-1796.
34. Manière, R. et Chamignon, C., " Cartographie de l'occupation des terres en zones arides méditerranéennes par télédétection spatiale", *Ecologia mediterranea*, V.12, (1986), 159-185.
35. Aidoud, A., " Pâturage et désertification des steppes arides d'Algérie, cas des steppes d'alfa (*Stipa tenacissima*)", *Paraleo*, V.37, (1994), 33-42.
36. M.A.D.R., Note sur la steppe, 2, Algerie, (2008), 7p.
37. Nedjimi, B., Houmid, A. M., "Problématique des zones steppiques algériennes et perspectives d'avenir", *Revue de Chercheur*, V. 4, (2006) ,13-19.
38. Nedjraoui, D., " Evaluation des ressources pastorales des régions steppiques algériennes et définition des indicateurs de dégradation", *U.R.B.T.*, (2002), 239-243.
39. Le Houérou, H.N., "Climate Change, drought and desertification", *Journal of Arid Environments*, V.34, (1996), 133-185.
40. Le Houérou, H.N., "An agro-bioclimatic classification of arid and semiarid lands in the isoclimatic mediterranean zones", *Arid Land Res. Manag.*, V.18,(2004), 301-346.
41. Nedjimi, B., Guit, B., "Les steppes algériennes : causes de déséquilibre", *Algerian Journal of Arid Environments* V.2 (2012), 50-61.
42. Halitim, A., Les sols des régions arides d'Algérie.Ed.OPU, Algérie, (1998), 384 p.
43. LE Houerou,H.N., " Biogeography of the aride steppe land north of the Sahara", *Journal of Arid Environments*, V.48, (2001), 103-128.
44. Djebaili, S.,Recherches phytosociologiques et écologiques sur la végétation des hautes plaines steppiques et de l'Atlas Saharien Algérien.Ed. OPU, Alger, (1984),177p.
45. Khelil, A.,L'écosystème Steppique : Quel Avenir ?, Ed. Dahlab, Alger, (1997),184p.
46. H.C.D.S., Problématique des zones steppiques et perspectives de développement, Rap. Synth., (2005), 10 p.

47. Bedrani, S., Une recherche d'action en zone steppique (objectifs-méthode et premiers résultats), les cahiers du cread, centre de recherche en économie appliquée pour le développement) n°31/32 (1994), 3e et 4 e trimestres.
48. Kanoun, M., Huguenin, J., Kanoun-Meguellati, A., Ziki, B., "Capacité d'adaptation des exploitations d'élevage" Renc. Rech.Ruminant, V.20, (2013), 257-260.
49. Benidir, M., Ghozlane, F., Yakhlef, H., " La sédentarisation et le développement durable de l'élevage ovin dans la steppe algérienne" in Colloque international « Développement durable des productions animales: enjeux, évaluation et perspectives », Alger, (Avril 2008), 20-21.
50. Kanoun, M., Adaptation des éleveurs ovins face aux multiples changements d'ordre environnementaux et socioéconomiques dans les territoires steppiques, cas des agropasteurs de la région d'el Guedid Djelfa, Th. Doct. E.N.S.A. Alger, (2015), 209 p.
51. H.C.D.S., Rapports situation de la steppe. Département Pédologie, (2012) ,12 p.
52. Bensouiah, R., 2003. La lutte contre la désertification dans la steppe algérienne : les raisons de l'échec de la politique environnementale, In 15èmes journées de la Société d' Ecologie Humaine, Marseille, (déc. 2003), 21 p.
53. Slimani, H., Hirche, A., L'état de la désertification en Algérie. *In Actes des journées internationales sur la désertification et le développement durable* .C.R.S.T.R.A., Biskra, (2006), 165-169.
54. Nedjraoui, D., et *al.*, La synthèse des résultats sur la flore, la végétation et l'occupation des terres en Afrique du Nord,Service Thématique Roselt /OSS, (2008) ,1-8.
55. Pouget, M., *Les relations sol-végétation dans les steppes sud-algéroises*.Th. Doc. Univ. Aix-Marseille III, Ed. O.R.S.T.O.M., Paris. (1980), 466p.
56. Boumezbeur, A. et Ben Hadj, M., Fiche descriptive sur les zones humides RAMSAR, Chott Zaherz chergui (Algérie). Direction générale des forêts, (2003), 10 p.
57. Pouget, M., Cartographie des zones arides, aptitudes du milieu à la mise en valeur : région de Messaad Ain El Ibel. DEMRH/ORSTOM. (1977), 91p.

58. Le Houérou H.N., "Man-Made Deserts: Desertization Processes And Threats", *Arid Land Res. Manag.*, V.16, (2002), 1-36.
59. Floret, C., Le Floch, E. et Pontanier, R., "Perturbation anthropique et aridification en zone présaharienne" In : Le Floch E., Grouzis M., Cornet A., Bille J C. (EDS), *L'aridité une contrainte de développement, caractérisation, réponses biologiques et stratégie de sociétés*. Ed. Orostom , Paris, (1992), 449-463.
60. Boukhobza, M., L'agropastoralisme traditionnel en Algérie, de l'ordre tribal au désordre colonial. Alger, (OPU),(1982), 458 p.
61. O.N.S., 2008 - Recensement Général de la Population et Habitat par wilaya et par communes.
62. Beniston, Nt-Ws, Fleursd'Algérie, Entreprise nationale des arts graphiques. Ed, Reghaia. Algérie,(1985), 112p.
63. Ozenda, P., Flore du Sahara, 2e édition. Ed. CNRS, Paris, (1983), 622 p.
64. Stoker, V. O., Der wasses-und photothesehaushlt Von wisten-Plian-zen dersidAlgerichen Sahara. In: Standorte and Versuch- spflanzen. Flora. Bd., (1974), p 163.
65. Ighil, Hariz, Z., Etude du comportement physiologique, biochimique et structurale du *Retamareatam* vis à vis du NaCl. Th. Mag.. Univ. Oran Algérie, (1990), 120p.
66. Allal, Benfakih, L., Recherche quantitatives sur le criquet migrateur *Locusta migratoria* dans le Sahara algérien. Perspectives de lutte biologique à l'aide de microorganismes pathogènes et de peptides synthétiques .Th. Doc. ENSA. El Harrach, (2006), p27.
67. Quezel, P. et Santa, S., Nouvelle flore de l'Algérie et des régions désertiques méridionales, 1-2 CNRS, Paris, France (1962-1963), 1-1165
68. Genmedoc, Pratique de germination dans les banques de semences. Banques de semences de la Méditerranée. programme *Interreg IIIB Medocc*, (2006), 35p.
69. Chehma, A., Catalogue des plantes spontanées du Sahara septentrional algérien, Univ. Ouargla, ECOSY,(2006), 141p.
70. Mittler, R., "Living under a dormant canopy : a molecular acclimation mechanism of the desert plant *Retamarætam*", the plant journal, Blackwell Science Ltd. (2001), V. 25, n° 4, 407-416.

71. Pugnaire, F.L., Haase, P., Puigdefábregas, J. "Facilitation between higher plant species in a semiarid environment", *Ecology*, V. 77, (1996), 1420–1426.
72. Gallego-Fernandez, J.B., Munoz Vallées, S., Dellafiore, C. M. " Expansion de un arbusto nativo-invasivo en dunas costeras : causas y consecuencias ecológicas", *Revista Chagual*, V.8, (2010), 41-48.
73. Haase, P., Pugnaire, F.I., Fernández, E.M., Puigdefábregas, J., Clark, S.C., Incoll, L.D., "Investigation of rooting depth in the semiarid shrub *Retama sphaerocarpa* (L.) Boiss. by labelling of ground water with a chemical tracer", *J. Hydrol*, V.177, ( 1996), 23–31.
74. Muñoz Vallés, S., Gallego-Fernández, J.B., Dellafiore, C., Cambrollé, J. " Effects on soil, microclimate and vegetation of the native-invasive *Retamamonosperma* (L.) in coastal dunes", *Plant Ecology*, V. 212, (2011), 169-179.
75. Maghrani, M., Lemhadri, A., Jouad, H., Michel, J.B., Eddouks, M., " Effect of the desert plant *Retama raetam* on glycaemia in normal and streptozotocin-induced diabetic rats", *Journal of Ethnopharmacology*, V. 87, (2003), 21–25.
76. Belmokhtar, Z., Kaid Harche, M., "In vitro antioxidant activity of *Retamamonosperma* (L.) Boiss.", *Natural Product Research*, V.28,(2014), 2324-2329.
77. González-Mauraza, H., Martín-Cordero, C., Alarcón-de-la-Lastra C., Rosillo, M. León-González, A.J., Sánchez-Hidalgo, M."Anti-inflammatory effects of *Retamamonosperma* in acute ulcerative colitis in rats", *Journal of Physiol Biochem*, V. 70,(2013), 163–172.
78. Poilicot, P., Les poaceae du Niger, Gland : UICN-CIRAD, Genève, (1999), 766 p.
79. Bouhadjera, K., Contribution à l'étude chimique et biologique de deux plantes médicinales sahariennes : *Oudneya africana* R.Br. et *Aristida pungens* L. Th. Doc.Univ. Abou Bekr Bel Kaid, (2005), 143p.
80. Ntets, B., Fleurs D'Algérie, Entreprise nationale du livre. Alger (1984), 81p.
81. Chaieb, M., "Comportement biologique comparé d'*Astragalus armatus* Willd. subsp. *Tragacanthoides* (Desf.) M. et de *Rhanterium suaveolens* Desf. sur la steppe sableuse dégradée de la zone aride tunisienne", *Ecologia mediterranea*, V. 23, n°314,(1997), 45-52.

82. Saoudi, M., Les bactéries nodulant les légumineuses (B.N.LP): caractérisation des bactéries associées aux nodules de la légumineuse *Astragalus armatus*.Th.Doc. Univ. Mentouri Constantine, (2008),150p.
83. Bouaziz, M., Dhouib, A., Loukil, S., Boukhris, M., and Sayadi, S., "Polyphenols content antioxidant and antimicrobial activities of extracts of some wild plants collected from the south of Tunisia", *Afr. J. Biotechnol.*, V.8, (2009),7017-7027.
84. Bate, R., Bensoussan, A., and Fan, Y., "Preliminary report of a randomized, double-blind, placebo controlled trial of a Chinese herbal medicine preparation CH-100 in the treatment of chronic hepatitis C", *J. Gastro. Hep.*, V.13, (1998), 244-247.
85. Kerry, C.B., "Fatigue syndrome and its herbal treatment", *J. Phytother.* V.3, (1993). 55-60.
86. Moussaoui Y., Ferhi, F., Elaloui, E., Ben Salem, R., Belgacem, M.N., "Utilisation of *Astragalus armatus* roots in papermaking", *Bioresources*, V.6, (2011), 4969–4978.
87. USGS., *Eolian processes, Dernière consultation en 2013.* <http://pubs.usgs.gov/gip/deserts/eolian/>
88. Nickling, W. G., Aeolian sediment transport and deposition, In *Sediment transport and depositional processes*, (Eds.), by K. Pye, Blackwell Scientific Publication, Oxford, (1994), 293-350.
89. Bielders, C.L., Rajot, J.R., Karlheinz, M., "*L'érosion éolienne dans le Sahel nigérien : influence des pratiques culturelles actuelles et méthodes de lutte*", *Sécheresse* V.15, (2004),19–32.
90. Mainguet, M., Le vent, mécanisme d'érosion, de dégradation, de désertification, *T.I.G.R.*, V.59-60, (1984),131-135.
91. Mainguet, M., "Désertification : Quels sont les vrais problèmes ? ", *L'information géographique*, V. 58, (1994), 58-62.
92. UNEP, *World Atlas of Desertification*, London, Edward Arnold , (1992), 69p.
93. Ozer, P., Bodart, C., Tychon, B., "Analyse climatique de la région de Gouré, Niger oriental: récentes modifications et impacts environnementaux", *Cybergeo*, V.308, (2005), 1-24.
94. Ozer, P., "Les lithométéores en région sahélienne: un indicateur climatique de la désertification" , *Eco.géo.Trop.*, V. 24, (2001),1-317.

95. Cooke, R.U., Warren, A. et Goudie, A.S., Desert geomorphology. London, ECL Press,(1993), 526 p.
96. Shao, Y.,Physics and Modelling of wind erosion, Atmospheric and Oceanographic sciences, Library, Kluwer academic publisher, (2000),128 p.
97. USDA-NRCS., 2002. National Agronomy Manual, 3e Edition, (2002), 502p.
98. FAO, Lutte contre l'ensablement l'exemple de la Mauritanie Rome, FORÊT 158, (2010), 76p.
99. Lyles, L., The U.S. wind érosion problem. Amer. Soc. Agr. Engin. Publication 7- 81, Proc. of the ASAE Conf. on Crop Production with Conservation in the 80s, December 1-2, 1980, Chicago, Illinois, (1980), 16-24.
100. Fryrear, D.W., Wind érosion. Handbook of Soil Science, M.E. Su miner (Ed.), CRC Press, (2000),195-196.
101. Shi, P., Yan, P., Yuan, Y. et Nearing, M.A., "Wind erosion research in China: past, present and future' ', Progress in Physical Geography, V.28, n°3,(2004),366-386.
102. Houyou, Z., Impact de la mise en culture en pluvial sur la dégradation du sol par érosion éolienne dans la steppe centrale (cas de la région de Laghouat).th doc. ENSA. El harrach, (2015),172p.
103. Toy, T.J., Foster, G.R., Renard, K. G.,Soil Erosion, Processes, Prediction, Measurement, and Control, John Wiley et Sons, New york, USA, 2002,338p.
104. Bagnold, R.A., "The size-grading of sand by wind"Proceedings of Royal Society of London A, V.16, n° 913, (1937), 250-264.
105. Chepil, W.S.,"A compact rotary sieve and the importance of dry sieving in physical soil analysis", Soil Sci. Soc. Am. Proc. V.26, n°1, (1962), 4-6.
106. Lynch,J.M.,. et Bragg, E., "Microorganismes and soil agregate stability" Adv soil science, V.2, (1985),133-171.
107. Tisdall, J.M., Oades, J.'M., "Organic matter and water stable aggregates in soils", Journal of Soil Science, V.3, (1982),141-163.
108. Soane,B.D.,"The role of organic matter in the soil compatibility the review of some practical aspects" Soil tillage Research, V.16, (1990),179-102
109. Bonneau, M., et Souchier, B., Pédologie. 2 : Constituants et propriétés du Sol. Masson Ed. Paris,(1979), 460 p.
110. Oades, J.M., "The rôle of biology in the formation, stabilizanon and dégradation of soil structure". Geoderma, 56, (1993), 337-400



111. Wilson, S.J., and Cooke, R.U., Wind erosion. See soil erosion, M.J.M. Kirkby et R.C.Morgan(eds), England, (1980), 217- 252.
112. Chepil, W.S., "Influence of moisture on erodibility of soil by wind" , Soil Sci. Soc. Am. Proc., V.20, (1956), 288-292.
113. Logie, M., "Influence of roughness element and soil moisture on the resistance of sand to wind érosion" Catena supplément, V.1, (1982),161 - 173.
114. Annabi, M., Haithem, B., "influence des racines sur la stabilité structurale d'un sol du Nord de la Tunisie", Etude et gestion des sols, V.18,2,(2011),63-73
115. Middleton, N., Thomas, D., World Atlas of desertification,2nd édition, United Nations Environment Programme, (1997),182p.
116. Chevrier, M., Potentiel de la télédétection hyperspectrale pour la cartographie des résidus de culture. Thèse de maîtrise. Département de Géographie.Université d'Ottawa, (2002),174 p.
117. Stone, R. P. et Moore, N., Control of Soil Erosion. OMAFRA, Factsheet No. 86-092, (1996).:<http://www.omafra.gov.on.ca/english/engineer/faeis/95-089.htm>.
118. Leys, J. et Mc Tainsh, G., "Soil loss and nutrient décliné by wind erosion-cause for concern", Australian Journal of Soil and Water Conservation, V.7, (1994), 30-40.
119. Lal, R., "Soil Erosion and Land Degradation", Advances in Soil Science, V.11,(1990), 176-201
120. Prospero, J. M., June., "Saharian Dust Impacts and Climate Change, case study", Oceanography V.19, n° 2,, (2006), 60-61
121. Utell, M. et Samet, J., Airborne particulates and respiratory disease: Clinical and pathogenic considérations. Particles in Our Air, Concentrations and Health Effects. Boston, Harvard University Press, (1996), 169-188.
122. Pope, C.A., "Epidemiology of fine particulate air pollution and human Health : Biologie mechanisms and who's at risk ?", Environmental Health and Perspectives, V.108, (200), 713-723.
123. Mainguet, M. et Dumay F., Fighting wind erosion: one aspect of the combat against desertification. Les dossiers thématiques du CSFD. N°3. CSFD/Agropolis International, Montpellier, France. (2011),44 p.

124. Gréco, J., La défense des sols contre l'érosion. Édit. La Maison Rustique, Paris, (1979), 183 p.
125. FAO., Manuel de fixation des dunes. Cahiers Conservation n°18, Rome, (1988), 68p.
126. Cornelis, W.M., Gabriels, D., Degryse, S., Hartmann, R., "L'efficacité de brise-vent végétaux dans la lutte contre l'érosion éolienne : expérimentation sur modèles réduits", Secheresse, note méthodologique, V.11, n° 1, (2000), 52-57.
127. CILSS., Comment fixer les dunnes pour freiner l'ensablement des champs, des pâturages et des cours d'eau, (Avril, 2011), 20p.
128. CDF, Biographie de la région de Laghouat. Rapport de Conservation de la forêt, (2011), 28p.
129. GIZ., Bonnes pratiques de CES/DRS. Contribution à l'adaptation au changement climatique et à la résilience des producteurs. Berlin, Allemagne, (2012), 56p.
130. Makhloufi, L. Nedjahi, A., Abedllaoui, M. et Benarar, A. ,Protection des périmètres agricoles dans la régions arides et semi-arides. INRF.Alger, (2012), 39p.
131. Taibi, AN., Le piémont sud du djebel Amour (Atlas saharien, Algérie), apport de la télédétection satellitaire à l'étude d'un milieu en dégradation. Ph.D. thesis, Université Denis Diderot, Paris VII, (1997), 310 p.
132. IAP, Exquise géologique de Laghouat au piedmont sud de l'Atlas saharien, bulletin de l'institut algérien de pétrole, (1972), 60 p.
133. ONM, Fiche des données climatiques, de la ville de Laghouat, station météo, Elgheneg, Laghouat, (1996-2016), 10p.
134. Prevost, P., Les bases de l'agriculture, Technique et documentation, Paris, (1999), 243 p.
135. Dajoz, R. ,Précis d'écologie, 8ème Ed., Gautier-Villars, Paris, (2006), 503p.
136. Bagnouls, F., et Gaussen, H., Saison sèche et indice xéothermique, Bull. soc. Hist. Nat., Toulouse, (1953), 193-239.
137. Braun Blanquet J., Roussine J.N. et Negre R. Prodrome des groupements végétaux de la France méditerranéenne, CNRS. Paris, (1951), 297 p.
138. Ramade, F., Elément d'Ecologie Fondamentale, Edition Mcgraw-Hill, (2001), 408p.

139. Daget, P, Poissonet, J., Prairies et pâturages, méthodes d'études et interprétations, Association Française de pastoralisme, CNRS, CIRAD,(2010), 955 p.
140. Gounot, M.,Méthodes d'étude quantitative de la végétation, Masson éd., Paris,(1969), 314 p.
141. Lacoste, A., et Salanon, R.,Elément de biogéographie et d'écologie, Ed Nathan, (2001), 312p.
142. Aidoud, A.,Contribution à l'étude des écosystèmes steppiques du Sud oranais : phytomasse, productivité primaire et applications pastorales, Mém.Mag., USTHB, Alger, (1983),245 p.
143. Quezel, P., La végétation du Sahara du Tchad à la Mauritanie, Stuttgart, Gustav Verlag, (1965), 333 p.
144. Aidoud, A., Contribution à l'étude des écosystèmes pâturés des hautes plaines Algérooranaises. Fonctionnement, évaluation, et évolution des ressources végétales. Th.Doc. USTHB, Alger, (1989),257 p.
145. Hirche, A., Boughani, A. et Nedjraoui D., "About grassland quality assessment in arid areas", In Etienne M. (ed.). Dynamics and sustainability of Mediterranean pastoral systems, Zaragoza, CIHEAM V.39, (1999), 193-197.
146. Daget, P., "Les prairies du Cantal, Valeur bromatologique", Rev, Haute-Auvergne, Avril-Juin (1974), 35 p
147. El-Bana, MI, Zhen Qing, L., Nijs, I., "Role of host identity in effects of phytogenic mounds on plant assemblages and species richness on coastal arid dunes",Journal of Vegetation Science, V.18, (2007), 635-644.
148. Soltner, D. ,Les bases de la production végétale T1, Le sol, 26 eme éd. Ed sc.tech.agr, , (2014), 472p.
149. Windisch, E.J., Mécanique des sols. Essais de laboratoire, École de technologie supérieure, (1999),108p.
150. Mathieu, C., et Pieltain, F.,Analyse chimique des sols,Methodes choisies. Ed Tec et DOC,Paris , (2003), 388p.
151. Klement, Z., Rudolph, K., Sands,DC.,Methods in Phytobacteriology, Akademiai Kiado, Budapest,(1990), 568 p.

152. Dutruc-Rosset, G., Techniques analytiques et de contrôle (Codex œnologique), Partie microbiologique. Office International de la Vigne et du Vin. , (2003), 23p
153. URBT, Rapport phytoécologique et pastoral de la Willaya de Djelfa, URBT, Alger, (1987), 156 p.
154. Floret, C., Pontanier, R., L'aridité en Tunisie présaharienne. Climat, sol, végétation et aménagement. Travaux et documents de l'ORSTOM n°150, Paris, (1982),p. 544.
155. Chehma, A., Etude floristique et nutritive spatio-temporelle des parcours camelins du Sahara septentrional algérien. Cas des régions d'Ouargla et Ghardaïa, Th. Doct., Univ. Annaba, (2005), 178p.
156. Chehma, A.,et Youcef, F., "Variations saisonnières des caractéristiques floristiques et de la composition chimique des parcours sahariens du Sud Est Algérien", *Sécheresse*, V. 20, n° 4, (2009), 373-381.
157. Monod, T., "Du désert", *Sécheresse*, V.3, n°1, (1992), 7-24. \*
158. Benaradj, A., Boucherit, H., Hasnaoui, O., Mederbal, K., et Sehli, A., "Rehabilitation of the steppe *Lygeumspartum* in the region of Naama (Western Algeria)", *EnergyProcedia*, V.36, (2013), 349 –357.
159. Djebaili, S., Recherches phyto-sociologiques et écologiques sur la végétation des Hautes Plaines steppiques et de l'Atlas saharien algériens. Thèse. Doct., Univ. Languedoc. Montpellier (France), (1978), 220 p.
160. Pouget, M., Etude agropédologique du bassin du Zahrez Rharbi (feuille du rocher de sel),RADP , secrétariat d'état à l'hydraulique, Alger, (1971), 158p.
161. Killian, Ch., Condition édaphiques et réaction des plantes indicatrices de la région alfatière algérienne. Ann. agron.,(1948), 24 p.
162. Emberger, L., "Aperçu général sur la végétation du Maroc", *Verof. Geobot. Inst. Rubel. Zurich*, V.14, (1939), 40-157.
163. Daget, P., "Le nombre de diversité de Hill, un concept unificateur dans la théorie de la diversité écologique", *Acta Oecol. Oecol. Gén.*, V.1, n°1, (1980), 51-70.
164. Kadi Hanifi, H., L'alfa en Algérie. Syntaxonomie, relations milieu- végétation, dynamique et perspectives d'avenir, Thèse. Doct., USTHB, Alger, (1998), 270 p.

165. Kadi Hanifi-Achour, H., "Diversité biologique et phytogéographique des formations à *Stipa tenacissima* L. de l'Algérie", *Sécheresse*, V.14, n°3, (2003), 169–179.
166. Guerrache, N., akkouche ,S. et Kadik, L., "Evaluation of the biodiversity and stabilization of the soil after the fixating of the dunes by *Retamareatam* Webb.", *academicJournal*, V.9, n°19,(2014), 1467-1479.
167. Akkouche, S., Kadik, L., Guerrache, N., Bouderbala, R., "characterizing the fixation of dunes nat the region of the region of djelfa in Algeria", *Int. J. Ecol. Dev.*, V. 32, n°3, (2017), DOI: 10.12911/22998993/70236
168. Shmida, A., et Burgess, T., L., Plant-growth from strategies and vegetation types in arid environments, In Evenari et al. (eds.), Plant form structure, Elsevier, Amsterdam, (1988), 379-387.
169. OSS., The North Western Sahara aquifer system (Algeria, Tunisia, Libya), joint management of transborder basin water, Synthesis collection- Tunis- N°1, (2008), 48p.
170. Salemkour, N., Benchouk, N., Nouasria, D., Kherief, S., et Belhamra, M., "Effets de la mise en repos sur les caractéristiques floristiques et pastorale des parcours steppiques de la région de Laghouat (Algérie)", *Journal des régions Arides. Numéro Spécial*, (2013), 103-114
171. Daget, P., et Poissonet, J., "Biodiversité et végétation pastorale, *Rev. Elev. Med. Vét. Pays trop*, V.50, n° 2, (1997), 141-144
172. Djebaili, S., Djellouli, Y., et Daget, P., "Les steppes pâturées des Hauts Plateaux algériens *Fourrages*. 120, (1989), 393-400.
173. Rekik, F., Bentouati, A., et Aidoud, A., "Evaluation des potentialités fourragères d'un parcours steppique à dominance de *Salsolavermiculata* L. dans l'EST de l'Algérie", *Livestock Research for Rural Development*, V. 26,(2014), Article 231.
174. Quézel, P., et Barbero, M., "Variations climatiques au Sahara et en Afrique sèche depuis le Pliocène : enseignements de la flore et de la végétation actuelles", *Bulletin d'Ecologie*, V.24, (1993), 191–202.
175. Floret, C., Le Floc'h, E., Romane, F., et Pontanier, R., " Dynamique de systèmes écologiques de la zone aride", *Acta Oecologica* , V.2, (1981), 195–214.

176. Cusseddu, V., Ceccherelli, G., Bertness, M., "Hierarchical organization of a Sardinian sand dune plant community", *PeerJ*, V.4, (2016), e2199, <https://doi.org/10.7717/peerj.2199>.
177. Neffati, M., Akrimi, N., Le Floc'h, E., "L'étude des conditions de germination des espèces, une nécessité pour le succès des travaux de réhabilitation", *ECOL MEDIT*, V.19, (1993), 39-47.
178. Lopez-Pintor, A., Gomez Sal, A., Rey Benayas, JM., "Shrubs as a source of spatial heterogeneity the case of *Retama sphaerocarpa* in Mediterranean pastures of central Spain", *Acta Oecologica*, V. 29, (2006), 247–255.
179. Pyke, AD., Archer, S., "Plant-plant interactions affecting plant establishment and persistence on revegetated rangeland", *J RANGE MANAGE*, V. 44, (1991), 550–557.
180. Muñoz-Vallés, S., Fernández, JBG., Dellafiore, C., Cambrollé, J., "Effects on soil, microclimate and vegetation of the native-invasive *Retama monosperma* (L.) in coastal dunes", *Plant Ecology*, V.212, (2011), 169–179.
181. Halvorson, JJ., Bolton, H., Smith, JL., Rossi, RE., "Measuring resource islands using geostatistics", *Great Basins Naturalist*, V.54, (1994), 313–328.
182. Yair, A., Lavee, H., Greitser, N., "Spatial and temporal variability of water percolation and movement in a system of longitudinal dunes, western Negev, Israel", *Hydrological Processes*, V.11, (1997), 43–58.
183. Alpert, P., Mooney, HA., "Resource heterogeneity generated by shrubs and topography on Coastal sand dunes", *VEGETATIO*, V.122, (1996), 83-93.
184. Danin, A., Bar-Or, Y., Yisraeli, T., "The role of cyanobacteria in stabilization of sand dunes in southern Israel", *Ecologia Mediterranea*, V.15, (1989), 55–64.
185. Kidron, GJ., "Differential water distribution over dune slopes as affected by slope position and microbiotic crust, Negev desert, Israel" *Hydrological Processes*, V.13, (1999), 1665–1682.
186. Verrecchia, E., Yair, A., Kidron, GJ., Verrecchia, K., "Physical properties of the Psammophile cryptogamic crust and their consequences to the water regime of sandy soils, north-western Negev Desert, Israel", *Journal of Arid Environments*, V.29, (1995), 427–438.
187. Hartmann, A., Schmid, M., Van Tuinen, D., and Berg. G., "Plant-driven selection of microbes", *Plant and Soil*, V.321, (2009), 235-257.

188. Sarig S, Fliessbach A, Steinberger Y. 1999. Soil microbial biomass under the canopy of coastal sand dune shrubs. ARID SOIL RES REHAB 13:75-80
189. El-Bana, M.I., Nijs, I., Kockelbergh, F., "Micro environmental and vegetation heterogeneity induced by phytogenic nebkhas in an arid coastal ecosystem", Plant and Soil, V. 247, (2002), 283–293.
190. Danin, A., Plants of desert dunes. In Adaptation of Organisms to the Desert. Ed. J L Cloudsley-Thompson. Springer Verlag, Heidelberg, (1996), 177 p.
191. Le Floch, H.E., " Biodiversité et gestion pastorale en zones arides et semi-arides méditerranéennes du Nord de l'Afrique". Bocconeia, V.13, (2001), 223–237.
192. Connell, J.H., Slatyer, R.O., "Mechanisms of succession in natural communities and their role in community stability and organization", American Naturalist, V. 111, (1977), 1119-1144