

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

المدرسة الوطنية العليا للفلاحة الحراش – الجزائر-

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE EL-HARRACH-ALGER-

THESE

En vue de l'obtention du diplôme de Doctorat en Sciences Agronomiques

Présentée par : Zohra HOUYOU

**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)**

Jury :

- Président :** Professeur Kadour DJILI (ENSA - Alger)
- Directeur de thèse :** Professeur Abdelkader DELLAL (Université de Tiaret)
- Co-directeur de thèse :** Professeur Charles. L BIELDERS (UCL – Belgique)
- Examineurs :** Professeur Aissa ABDELGUERFI (ENSA - Alger)
Professeur Mahfoud AMARA (ENSA - Alger)
Professeur Med. Said GUETTOUCHE (USTHB - Alger)

Le 30 Juin 2015

Remerciements

*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 au professeur **Charles BIELDERS** initiateur du travail, qui a guidé nos premiers pas dans le domaine de l'érosion éolienne, merci de m'avoir accordé l'occasion pour effectuer ce travail de recherche. Il a 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 durant les moments difficiles, les nombreuses discussions que nous avons eues et ses conseils ont été primordiaux à l'aboutissement de ce travail. **Grand** merci.*

*J'adresse mes sincères remerciements au professeur **Abdelkader DELLEAL**, mon directeur de thèse pour son aide précieuse, ses conseils et la patience dont il m'a fait preuve lors de l'élaboration de ce travail.*

*Mes remerciements s'adressent aussi aux membres du jury : le professeur **Kadour DJILI** qui nous fait l'honneur d'assumer la présidence.*

*Je tiens à remercier le professeur **Mohammed Said GUETTOUCHE** qui a accordé une attention particulière au travail en acceptant de faire partie du jury de ma thèse.*

*Mes remerciements vont également aux professeurs **Mahfoud AMARA** et **Aissa ABDELGUERFI** pour avoir accepté d'examiner mon travail. C'est un honneur et un moment intense de présenter ce travail devant vous.*

*Mes remerciements s'adressent à **Ali CHATTI**, technicien aux ateliers du département du génie mécanique à l'université de Laghouat pour la réalisation des **BSNE** et pour sa sympathie.*

*Je veux également remercier **Nicholas GOFFIN**, pour sa collaboration efficace durant les premières installations du dispositif expérimental sur le terrain.*

*Merci également aux personnes qui ont contribué à la pénibilité du travail de terrain **Slimane, Mohamed ZAITRI** et **Aissa SELLAM**.*

*Je tiens aussi à remercier toutes les personnes qui m'ont apporté leur aide et fait partagé leurs compétences pour la réalisation de ce travail : **Maxime DUPRIEZ, Tidjani KOUIZI, Belkacem TAKHI, Zohra BENADJILA, Louis KONGONDA, et Siavash MAHMOUDZADEH.***

*Merci à toutes les personnes du **GERU** pour leur gentillesse et leur bonne humeur durant les séjours à l'**UCL**.*

*Merci à **Djamel BENLINANI, Aissa SAOUDI et Mohamed CHENAFI** pour leur aide précieuse.*

Merci à toutes les personnes et les membres des équipes de recherche du laboratoire de mécanique de l'université de Laghouat.

Mes pensées vont également aux membres de l'équipe désertification et climat.

Résumé

Les changements climatiques, l'accroissement démographique et la gestion inadaptée de la steppe algérienne constituent un des moteurs de sa dégradation. Le manque de création d'emplois entraîne depuis quelques décennies une pression accrue sur les terres des parcours steppiques. Et de ce fait une partie de la population steppique se tourne vers les activités pour lesquelles les barrières n'existent pas : élever quelques têtes de brebis et cultiver un morceau de terre. D'autre part pour combler le déficit alimentaire du cheptel, les éleveurs et les agro-éleveurs au lieu d'intensifier les cultures fourragères, optent pour les céréales par le défrichement des parcours steppiques qui sont réputés pour être squelettiques et dont les effets sont l'augmentation du risque de la dégradation de leurs terres par érosion éolienne.

Le phénomène de défrichement des parcours steppiques est de plus en plus dangereux, il se traduit par une forte disparition du couvert végétal et une importante érosion du sol, dont la conséquence est une dégradation irréversible de ces espaces. Des études au Sahel ont montré qu'il existe une relation étroite entre la dynamique de la couverture végétale, la dynamique des vents et la dégradation des terres par érosion éolienne.

La région de Laghouat, siège de nos recherches, se situe sur le piémont Sud de l'Atlas Saharien. Elle est caractérisée par une végétation basse, clairsemée et une pluviométrie annuelle de 200 mm. A l'image de la steppe les parcours de la wilaya de Laghouat sont le lieu de défrichements pour la mise en place d'une céréaliculture en pluvial dont la récolte est incertaine, augmentant ainsi le risque de leur dégradation par érosion éolienne. L'objectif principale de cette thèse est de mesurer cette dégradation. Pour atteindre cet objectif, une parcelle de 1.35 ha dans le parcours de Mokrane à Laghouat, a été défrichée et cultivée à l'orge (*Hordeum Vulgare*) en pluvial. Des capteurs de sables de type BSNE ont été utilisés pour mesurer les flux éoliens en 2009, 2010, et 2011. Une station météo (Campell Scientific) équipée de quatre anémomètres, d'une girouette, d'un pluviomètre et d'un saltiphone a servi à la caractérisation des événements éoliens. Les résultats de mesures montrent que les tempêtes de sable à Laghouat durent parfois plusieurs jours. Les événements érosifs sont quant à eux de durées très variables allant de quelques minutes à plusieurs heures et entrecoupés par des périodes de calme de durées similaires. Les directions des vents érosifs oscillent entre l'ouest et le nord. Les vitesses moyennes du vent pendant la saltation sont comprises entre 6,2 et 7,3 m/s. La vitesse seuil de l'érosion fluctue entre 5,7 m/s et 7,6 m/s et ne montre pas de tendance saisonnière claire. Les bilans de masse mesurés sont généralement négatifs mais peuvent occasionnellement prendre des valeurs positives. Des pertes en terre totales de -155 t/ha ont été mesurées sur une période de 25 mois. Ceci illustre le fort potentiel de dégradation des sols en cas de leur mise en culture pluvial.

D'autre part des relevés de la végétation du parcours de Mokrane ont révélé un taux de recouvrement du sol de 35 % par un groupe de 28 espèces végétales psammophiles. Le taux de couverture du sol par les sables était de 47 %. Le parcours présente un indice moyen de diversité spécifique au alentour de 2.5 et un indice d'équitabilité moyen de 65 %. Des chiffres indicateurs de l'équilibre écologique d'une végétation à faibles indices spécifiques et qui offrent une charge pastorale potentielle de 7.75 ha/ U ovine relativement très basse et indicatrice d'une dégradation du parcours.

Les résultats des études menées dans le cadre de cette thèse dans le parcours de Mokrane incitent à ce que des mesures doivent être prises pour empêcher la perte graduelle, des fonctions de la steppe : i) Economique, support de la production de viande ovine et ii) Stratégique, zone tampon entre le Sahara au sud et la réduite bande agricole du nord du pays.

Mots clés : Erosion éolienne, céréaliculture en pluvial, steppe, végétation, dégradation des sols, Laghouat.

Abstract

Climate change, population growth and inadequate management of the Algerian steppe is one of the causes of its degradation. The lack of job creation in the recent decades causes increasing pressure on the steppe rangelands. Thereby part of the steppe population turns to the activities for which the barriers do not exist: raise some heads of sheep and cultivate a piece of land. In addition, to bridge the food gap of livestock, pastoralists and agro-pastoralists instead of intensifying forage crops, opt for cereals by clearing steppe rangelands that are renowned skeletal, the consequences are the increased risk of degradation of their land by wind erosion.

The steppe rangelands clearing phenomenon is increasingly dangerous, it results in a high loss of vegetation cover and significant soil erosion, the consequence is an irreversible degradation of these areas. In the Sahel, Studies show that there is a close relationship between the dynamics of the plant cover, the dynamics of wind and land degradation by wind erosion.

Laghouat, the place of our research is on the southern foothills of the Saharan Atlas. Sparse low vegetation and 200 mm of annual rainfall characterize the region. As in the whole of the Algerian steppe, grazing of Laghouat are cleared for the establishment of a rainfed crops whose harvest is uncertain, and therefore the risk of their degradation by wind erosion is increased. The main aim of this thesis is to measure this type of degradation. To achieve this, a plot of 1.35 ha in the course Mokrane in Laghouat was cleared and cultivated barley (*Hordeum vulgare*) rainfed. BSNE type sands sensors were used to measure the wind flow in 2009, 2010 and 2011. A weather station (Campbell Scientific) equipped with four anemometers, a wind vane, a rain gauge and a saltiphone were used to characterize wind events. The measurement results show that the sandstorms in Laghouat that last for days. Erosive events are in turn very variable periods ranging from minutes to several hours and interspersed with quiet periods of similar duration. Directions erosive winds oscillate between the west and north. The average wind speeds during saltation are between 6.2 and 7.3 m / s. The erosion threshold speed fluctuates between 5.7 m / s and 7.6 m / s and does not show a clear seasonal pattern. The measured mass balances are generally negative but may occasionally take positive values. Soil Loss Total -155 t / ha were measured over a period of 25 months. This illustrates the strong land degradation potential if their application rainfed crop.

On the other hand, the vegetation surveys of Mokrane course revealed 35% recovery rate of the ground by a group of 28 psammophiles plant species. Ground rate coverage by the sands was 47%. The grassland had an average index of species diversity at around 2.5 and a mean equitability index of 65%. Indicators figures of the ecological balance of low specific indices vegetation and offer a potential pastoral care of 7.75 ha / sheep U relatively low and indicative of a breakdown of the course.

The results of studies conducted as part of this thesis in the course Mokrane encouragement to ensure that measures must be taken to prevent the gradual loss of function of the steppe: i) Economic, support sheep meat production and ii) Strategic, buffer zone between the Sahara in the south and reduced agricultural belt in the north of the country.

Keywords: Wind erosion, rainfed cereal cropping steppe, vegetation, soil degradation, Laghouat.

ملخص:

! " # ! \$ % \$
 & ' ! ' # ' () * ! + (, + - \$ " . (" % / 0 1 + 2 3 , %
 \$ " = ! < 7 / ' - 8 + 9 / : ; 7 * * 6 4 - 5 (+ 3 -
 * > % , 8 - ! (, + * + = 1 > ? @ ' 4 * " + ' 5 ,
 < A * ? , , * # - 9 ' *
 0 , < ! 4 , + + ! / " - % , + * ! 7 / ' * - * # - \$ B " C
 1 * * * # - \$ ' * " - 8 D + ' (1 ! D * ! 7 * C (< A - ! *
 3 = 7 % * # - \$ * E > : , - 4 A = ! , + " @ * (0 - 9 / 0 -
 < ! - 4 ' , FGG 1 -
 , + " + 2 % > % * ! 1 D \$! * -) * ! + , H 0 -
 < - 4
) 3 0 A 1 + @ * ? D : 8 ! & 0 1 ' ! ?
 < 0 ! ' * 5 * + J < KL ! 7 (- 8
 FGGQ ! 1 D % 7 4 - 8 - , + + MNOP B ' * 8 % ! 1 3 : 0
 A " 5 : 0 * ! " ^ STUVWX NYZ [\] ^ ZYR E > - (, ! < FGJJ FGJG
 < A) (? > ' = ! * " (- , : 0 A "
 1 5 \$ ' * * A (" ! - 9 / , ? > ' (' * ! 0 _
 ^) a R L < b ' * " > 1 | * + + ! < ^) a R b < K ^) a R ` < F ' * ' = 1 D % A + ! - !
 < ^) a R b < ^
 FL . ^ a ' - R JLL c * 8 ' 0 . (* , * ! . % (* 0 _ C (< 0 ! ' * ! \$ 7 d . 8 e 5
 ' ? > Fg ' + 1 D % ' fKL c * 0 - \$ * ! 0 - , * ! - 5 , + " D +
 < fhb 1 + 7 4 e - ! 1 - \$ 1 < *
 d * , * ' , + ' 4 f ` L ? > i 5 ; F < L c * 8 B 5 ;
 < , + 1 = % 8 * \$: (, b < bL 8 = + 1 " 8 !

الكلمات المفتاح:

< - 9 / * ? D 0 ! \$ * + A 1 + * ?

Table des matières

Remerciements	i
Résumé	iii
Abstract	iv
ملخص	v
Sommaire	vi
Liste des tableaux	x
Liste des figures	xi
Introduction générale	1
Chapitre 1 Dégradation des terres et érosion éolienne	7
1. Dégradation des terres à l'échelle de la planète et en Afrique.....	7
1.1. Formes et processus de la dégradation des terres.....	8
2. Dégradation des terres en Afrique du Nord et ampleur de l'érosion éolien.....	10
3. Quantification de l'érosion éolienne.....	13
3.1. Les forces intervenant dans le processus de l'érosion éolienne.....	13
3.1.1. Les forces d'entraînement des particules.....	14
3.1.2. Les forces de détachement des particules.....	14
3.1.3. Les forces de transport des particules.....	16
3.1.4. La sédimentation ou dépôt des particules.....	18
3.2. La vitesse du vent.....	18
3.2.1. Le profil de la vitesse du vent.....	18
3.2.2. La vitesse seuil de l'érosion éolienne.....	20
3.3. Le flux de masse horizontal.....	20
3.4. Interactions entre les différents modes et taux de transport.....	21
3.5. Facteurs influençant l'érosion éolienne.....	22
3.5.1. Facteurs d'érosivité.....	22
3.5.2. Facteurs d'érodibilité.....	23
Chapitre 2 Cadre physique de l'étude, la région de Laghouat	26
1. La wilaya de Laghouat position et situation géographique.....	26
2. Cadre Géologique de la wilaya de Laghouat.....	28
3. Cadre géomorphologique de la wilaya de Laghouat.....	30
3.1. Les reliefs.....	30
3.1.1. Les Djebels et montagnes.....	30
3.1.2. Les piémonts.....	30
3.1.3. Les surfaces subhorizontales.....	31
3.2. La Haute surface.....	31
3.2.1. Les formations encroûtées du quaternaire ancien.....	31
3.2.2. Les formations plus ou moins encroûtées du quaternaire moyen.....	31
3.2.3. Les formations du quaternaire récent et actue.....	32
3.3. Les dépressions (Dayas).....	32

3.4. Les formations éoliennes.....	33
3.4.1. Les formations éoliennes anciennes et fixées.....	33
3.4.2. Les formations éoliennes mobiles non ou peu fixées.....	34
3.4.3. Voiles sableux.....	34
4. Cadre pédologique de la wilaya de Laghouat.....	35
4.1. Types de sols dans la wilaya de Laghouat.....	36
4.1.1. Sols minéraux bruts.....	36
4.1.2. Sols peu évolués.....	37
4.1.3. Sols calcimagnésiques.....	39
4.1.4. Sols isohumiques.....	41
4.1.5. Sols des dayas.....	41
5. Climatologie de la wilaya de Laghouat.....	41
5.1. Type de temps en Algérie.....	42
5.1.1. Un régime anticyclonique.....	42
5.1.2. Un régime cyclonique de front polaire.....	42
5.1.3. Des régimes de front des alizés.....	43
5.1.4. Un régime mixte.....	43
5.2. Analyse climatique de la wilaya Laghouat.....	44
5.2.1. Diagramme Ombrothermique de Bagnouls et Gaussen	45
5.2.2. Le vent à Laghouat.....	47
6. La flore de la wilaya de Laghouat.....	49
7. Cadre démographique et l'agriculture dans la wilaya de Laghouat.....	50
7.1. Population de la wilaya.....	50
7.2. Evolution de la répartition population rurale dans la wilaya de Laghouat.....	51
7.3. Le secteur de l'agriculture dans la wilaya de Laghouat.....	52
7.3.1. Occupation des terres dans la wilaya de Laghouat.....	53
7.3.2. Evolution du cheptel Ovins dans la wilaya de Laghouat.....	54
7.3.3. Evolution de la SAU dans la wilaya de Laghouat.....	55
7.3.4. Etat des terres dans la wilaya de Laghouat.....	56
8. Dégradation des terres dans la wilaya de Laghouat.....	58

Chapitre 3 Effet de la mise en culture en pluviale sur la dégradation du sol par érosion éolienne dans la région de Laghouat

1. Matériels et méthodes.....	60
1.1. La zone lieu de l'étude.....	60
1.2. Champ expérimental.....	61
1.3. Dispositif de mesures.....	62
1.3.1. Données météorologiques.....	63
1.3.2. Capteurs de sable.....	65
1.4. Epaisseur de l'horizon superficiel du sol du champ.....	68
1.5. Analyses de sol.....	68
1.5.1. Granulométrie.....	68
1.5.2. Carbonates de Calcium.....	69
1.5.3. pH.....	70
1.5.4. Eléments majeurs.....	70
1.5.5. Azote total (N_{tot}), carbone total (C_{tot}) et matières organiques.....	70
1.6. Méthodologie d'exploitation des données.....	70
1.6.1. Caractérisation des évènements éoliens.....	70
1.6.1.1 Détermination du nombre et de la durée des évènements érosifs.....	70
1.6.2. Calcul de la vitesse seuil de saltation.....	71

1.6.3. Calcul de la vitesse et de la direction moyenne du vent.....	72
1.6.4. Calcul des flux de sédiments de la parcelle.....	73
1.6.5. Calcul du bilan de masse de sédiments de la parcelle.....	75
2. Résultats.....	77
2.1. Caractéristiques physico-chimique du sol de la parcelle.....	77
2.2. Climatologie de la zone d'étude.....	79
2.2.1. Températures.....	79
2.2.2. Précipitations.....	80
2.2.3. Humidité relative.....	80
2.2.4. Vitesses du vent.....	81
2.2.5. Direction du vent.....	82
2.2.6. Direction du vent pendant la saltation.....	83
2.2.7. Dynamique de la vitesse seuil de saltation des périodes d'érosion éolienne.....	84
2.2.8. Caractéristiques des périodes.....	85
2.2.8.1. Mesures pendant la période de fonctionnement du saltiphone.....	86
2.2.8.2. Mesures sans enregistrements de la saltation.....	88
2.3 Bilans de masse.....	89
2.3.1. Mesures avec enregistrement de la saltation.....	89
2.3.2. Relation entre les bilans de masse et les directions moyennes vectorielles du vent.....	89
2.3.3. Mesures sans enregistrements de la saltation.....	91
2.3.4. Effet de la direction du vent sur le bilan de masse.....	93
3. Discussions.....	93
3.1. Saltation.....	93
3.2. Vitesse seuil de l'érosion éolienne.....	94
3.3. Vitesse moyenne et vitesse maximale du vent pendant la saltation à 3,6 m.....	95
3.4. Direction des vents érosifs.....	95
3.5. Bilans de masse.....	96
3.5.1. Mesures effectuées avec enregistrement de la saltation.....	96
3.5.2. Mesures effectuées sans enregistrement de la saltation.....	98
3.5.3. Effet de la direction du vent sur le bilan de masse à l'échelle de la parcelle expérimentale	98
4. Conclusions.....	98

Chapitre 4 Eléments de la surface du sol et productivité pastorale dans le parcours de Mokrane à Laghouat

100	100
1. Introduction.....	100
2. Matériels et méthodes.....	102
2.1. Le lieu de l'étude et justification du choix.....	102
2.2. Le relevé linéaire.....	103
2.3. Méthode d'approche du terrain.....	104
2.4. Mode opératoire et emplacement des relevés sur le terrain.....	106
2.5. Analyses des données de terrain.....	107
2.5.1 Analyse floristique.....	107
2.5.1.1. Identification, classification des espèces végétales.....	107
2.5.1.2. La richesse floristique totale du tapis végétal (s).....	107
2.5.1.3. La fréquence spécifique (Fsi).....	108
2.5.1.4. La contribution spécifique au tapis végétal (Csi).....	108
2.5.1.5. Diversité spécifique (H') ou indice de Shannon.....	108

2.5.1.6. Equitabilité (E_Q).....	109
2.5.1.7. Le recouvrement global de la végétation (RG).....	110
2.5.1.8. La productivité pastorale et valeur pastorale du parcours.....	110
2.5.1.9. La charge pastorale du parcours.....	112
2.5.2. Les éléments de la surface du sol.....	112
3. Résultats.....	113
3.1. Flore du parcours.....	113
3.1.1. Richesse totale.....	113
3.1.2. La richesse stationnelle.....	116
3.1.3. Diversité spécifique et Equitabilité dans le tapis végétale.....	116
3.1.4. Le recouvrement global de la surface du sol.....	119
3.1.5. Valeur pastorale, productivité et charge pastorale.....	121
4. Discussions.....	123
4.1. Richesse floristique du tapis végétal.....	123
4.2. Fréquence spécifique (FSi) et contribution spécifique (CSi).....	124
4.3. Diversité spécifique et Equitabilité dans le tapis végétal.....	124
4.4. Recouvrement globale de la surface du sol.....	126
4.5. Valeur pastorale, productivité pastorale et charge du parcours.....	128
5. Conclusions.....	130
Conclusions générales.....	132
Perspectives.....	134
Références bibliographiques.....	138
Annexes.....	155

Liste des tableaux

Tableau 1 Importance de la dégradation des terres par grande zone d'activité dans le monde.....	8
Tableau 2 Répartition des superficies affectées par la dégradation des terres (Mha).....	10
Tableau 3 Proportion des terres des zones semi arides et arides affectées par la dégradation.....	11
Tableau 4 Importance relative des superficies atteintes par diverses formes de dégradation des terres (semi arides et arides) nord-africaines.....	12
Tableau 5 Teneurs moyennes en éléments majeurs, et classe granulométrique de la couche superficielle du sol de la parcelle expérimentale.....	78
Tableau 6 Caractéristiques des périodes de l'érosion éolienne (Mesures effectuées avec enregistrements de saltation).....	87
Tableau 7 Caractéristiques des périodes de mesures (Mesures effectuées sans enregistrements de saltation).....	88
Tableau 8 Directions du vent et bilans de masse durant les événements érosifs.....	92
Tableau 9 Localisation géographique des stations d'étude.....	107
Tableau 10 Espèces inventoriées dans la première unité géomorphologique (Espace dunaire).....	114
Tableau 11 Espèces inventoriées dans la deuxième unité géomorphologique.....	115
Tableau 12 Richesse floristique dans les différentes stations étudiées.....	117
Tableau 13 Evolution de la Diversité spécifique (H') et de l'Equitabilité (Eq) des espèces relevées dans les stations étudiées.....	118
Tableau 14 Evolution du recouvrement global de la végétation et des éléments de surface dans les deux unités géomorphologiques.....	120
Tableau 15 Evolution de la valeur pastorale, de la productivité pastorale et de la charge Pastorale.....	122

Liste des figures

Figure 1 Les forces intervenant dans le processus de l'érosion éolienne.....	14
Figure 2 Modes d'entraînement des particules.....	16
Figure 3 Illustration des modes de transport pendant un évènement érosif.....	17
Figure 4 Variation de la hauteur de rugosité aérodynamique en fonction la couverture du sol...19	
Figure 5 Relation entre le détachement et la charge en sédiments.....	22
Figure 6 Situation géographique de la wilaya de Laghouat.....	27
Figure 7 Profils géologiques dans l'Atlas Saharien région de Laghouat.....	29
Figure 8 Schéma théorique montrant quelques unités géomorphologique dans les steppes sud Algéroises.....	34
Figure 9 Principales formations éoliennes mobiles.....	35
Figure 10 Carte des sols de la wilaya de Laghouat.....	38
Figure 11 Représentation schématique des flux atmosphériques pour l'Afrique du Nord.....	44
Figure 12 Diagramme Ombrothermique de Bagnouls et Gaussien dans trois stations climatiques de la wilaya.....	46
Figure 13 Direction moyenne des vents au sol pour chaque mois de l'année.....	48
Figure 14 Evolution de la population de la wilaya de Laghouat (1987-2012).....	51
Figure 15 Evolution de la population rurale dans la wilaya (1987-2012).....	52
Figure 16 Evolution de la répartition de la main d'œuvre active dans la wilaya de Laghouat par secteur d'emploi.....	53
Figure 17 Evolution de la répartition des terres dans la wilaya de Laghouat (1991-2012).....	54
Figure 18 Evolution du cheptel ovin dans la wilaya de Laghouat (1991-2012).....	55
Figure 19 Evolution de la répartition des terres de la SAU dans la wilaya de Laghouat (1991-2012).....	56

Figure 20 Etat des terres dans la wilaya de Laghouat.....	57
Figure 21 Carte des risques de la dégradation des terres dans la wilaya de Laghouat.....	59
Figure 22 Formations géologiques et localisation de la zone lieu de l'étude.....	61
Figure 23 Représentation du dispositif de mesure (BSNE et station météo) en place sur la parcelle expérimentale.....	62
Figure 24 Schéma de la parcelle expérimentale et dispositif de mesure.....	63
Figure 25 Représentation de la station météo.....	64
Figure 26 Représentation d'un saltiphone.....	65
Figure 27 Capteur de sable standard de type BSNE.....	66
Figure 28 Dispositif de mesure au champ composé d'un mât sur lequel 5 capteurs BSNE reposent.....	67
Figure 29 Profil du sol de la région de Mokrane à Laghouat.....	68
Figure 30 Détermination de la vitesse seuil de saltation.....	72
Figure 31 Exemple d'intégration du profil par la méthode des trapèzes.....	75
Figure 32 Représentation de la méthodologie du calcul du bilan de masse de sédiment.....	77
Figure 33 Variations saisonnières des températures journalières maximales et moyennes mesurées dans le périmètre de Mokrane.....	79
Figure 34 Variations saisonnières des précipitations dans le périmètre de Mokrane.....	80
Figure 35 Variations saisonnières de l'humidité relative de l'air journalière maximale et moyenne dans le périmètre de Mokrane.....	81
Figure 36 Variations saisonnières de la vitesse maximale journalière du vent et de la vitesse moyenne journalière du vent mesurée à 3,64 m dans le périmètre de Mokrane.....	82
Figure 37 Fréquences des directions du vent pour différentes classes de vitesse.....	83
Figure 38 Directions du vent pendant la Saltation (% des observations).....	84
Figure 39 Dynamique de la vitesse seuil d'érosion.....	85
Figure 40 Relation entre la direction du vent durant la saltation et la direction du vent pour la vitesse supérieure au seuil de la saltation.....	90

Figure 41 Relation entre les bilans de masse durant la saltation et le bilan de masse pour la vitesse supérieure au seuil de la saltation.....	91
Figure 42 Effet de la direction moyenne du vent sur le bilan de masse à l'échelle de la parcelle expérimentale.....	93
Figure 43 Localisation du parcours étudié dans la zone de Mokrane.....	103
Figure 44 Représentation des deux unités géomorphologiques étudiées dans le parcours de Mokrane.....	105

Introduction générale

L'érosion éolienne est un phénomène naturel résultant de l'effet combiné du climat et de l'état de la surface du sol. C'est un important facteur physique d'épuisement des terres agricoles (Biielders *et al.*, 2002 ; Gomes *et al.*, 2003 ; Visser *et al.*, 2005a ; Labiadh *et al.*, 2013 ; Hoffmann *et al.*, 2011). Le transport des particules du sol par le vent provoque une dégradation environnementale sévère engendrant l'appauvrissement des terres et la réduction de leur production (Michels *et al.*, 1995 ; Sterk and Raats, 1996 ; Biielders *et al.*, 2002 ; Visser *et al.*, 2005c ; Ikazaki *et al.*, 2012, Lancaster and Baas, 1998 ; Khardous, 2005 ; Tidjani *et al.*, 2009 ; Touré, 2011). La dégradation des terres par érosion éolienne se produit essentiellement dans les régions où le vent est suffisamment fort et le sol est peu couvert, sec et émiétté (Lysles, 1977 ; Nickling, 1994), c'est dans les régions hyperarides, arides et semi-arides qu'elle est la plus active (Mainguet, 1991). La couverture végétale des espaces contribue fortement à protéger les sols contre la dégradation par le vent (Lancaster and Baas, 1998 ; Rajot, 2001 ; Biielders *et al.*, 2002, 2004 ; Leenders *et al.*, 2007 ; Touré *et al.*, 2011). Elle intervient en faveur de la protection des terres contre l'érosion éolienne par son action de réduire la vitesse du vent à la surface du sol, cela dit que la plupart des sols ont besoin d'une couverture végétale suffisamment dense pour prévenir l'action destructrice de l'érosion éolienne (Woodruff et Siddoway, 1965). L'homme, par ses activités et ses aménagements, joue un rôle essentiel de déclencheur ou d'accélérateur de l'érosion éolienne des terres dans les zones sèches (Dregne, 2002 ; Reynolds *et al.*, 2007). L'accroissement démographique enregistré ces dernières décennies dans les zones sèches a provoqué une pression accrue sur les espaces et une surexploitation des ressources naturelles (FAO, 2005, 2011) conduisant parfois à la stérilité des sols (Dregne *et al.*, 1991). Une surcharge animale, une phytomasse faible par rapport à leurs potentialités et un pâturage sans temps de repos suffisant pour la régénération du couvert végétale est à l'origine de la dégradation de nombreux parcours (CSFD, 2002 ; OSS, 2004). Egalement la mise en culture des terres favorise l'action du vent sur le sol (Sterk and Span, 1997 ; Rajot, 2001 ; Biielders *et al.*, 2002). L'enlèvement partiel ou total des particules superficielles du sol est alors facilité, et dont la conséquence est une dégradation par érosion ou ensablement des aires agricoles. L'érosion éolienne, de même que l'ensablement constituent des gênes majeures dans les espaces agricoles des écosystèmes arides ou semi arides, engendrant pauvreté et migrations des populations qui abandonnent

leurs terres devenues improductives pour des terres nouvelles ou pour les villes. Et donc l'érosion éolienne est le principal allié de la désertification dans les zones sèches (Mainguet, 1984, 1991 ; Dregne *et al.*, 1991).

Le phénomène de la désertification est particulièrement marqué en Algérie en raison de ses spécificités écologiques. Ainsi, sur les 238 millions d'hectares de la superficie du pays, 200 millions sont occupés par la zone saharienne au sud du pays, où l'activité éolienne est naturellement présente à des degrés divers. Sur les 38 millions d'hectares restant, 20 millions d'hectares de terres steppiques en zones aride et semi-aride, espace intermédiaire où vit une population de 6 millions d'habitants, sont soumis à une pression anthropique croissante. Ce sont ces terres des parcours steppiques qui sont le plus concernées par la dégradation. Géographiquement elles sont localisées aux environs de 30° de latitude Nord, elles sont limitées au nord par l'isohyète 400 mm et au sud par l'isohyète 100 mm , entre ces limites les espaces sont les lieux d'un surpâturage et de cultures céréalières en pluvial, faisant ainsi détériorer davantage la situation en favorisant la mise en place de sols dénudés, souvent assez émiétés et par conséquent plus facilement soumis au décapage éolien et une désertification certaine. L'état des lieux dressé par les services du ministère de l'agriculture algérien dénombre cinq classes de terres steppiques : les parcours classés bons représentent 5 % de la surface totale de la steppe, les parcours classés moyens représentent 10,9 %, les parcours dégradés représentent 7,84 % de la surface globale de la steppe, mais le plus vaste territoire de la steppe algérienne est classé comme très dégradé avec 57.75 % de la surface totale de la steppe, le reste étant des espaces improductifs (HCDS, 2010).

De même, la carte de sensibilité à la désertification établie par le Centre national des techniques spatiales révèle que sur la totalité de la superficie de la steppe algérienne, 53 % est classée comme zone très sensible et sensible à la désertification (Oussedik *et al.*, 2003).

Les politiques de lutte contre la dégradation des sols steppiques en Algérie ont été nombreuses et diversifiées. Depuis 1962 des actions entreprises par les autorités notamment les chantiers populaires de reboisement et qui ont concerné jusqu'à 1969 la plantation Forestière de 99.000 ha dans la steppe. Le projet du barrage vert lancé en 1974 couvrant les zones arides et semi arides comprises entre 200 et 300 mm, et durant la même période la promulgation du code pastoral visant la limitation des gros cheptels par la création de coopératives pastorales. Au cours des années quatre vingt l'adoption du dossier steppe donnant lieu à la création du haut commissariat au développement de la steppe (HCDS), succédés par les programmes de mise

en valeur des terres marginales et par le programme nationale de développement agricole (PNDA) qui a débuté vers l'année 2000 visant la limitation de la céréaliculture pluviale au dépend de cultures irriguées mais au profit d'un pompage d'eau n'ont pas évité certaines erreurs environnementales et techniques.

L'équilibre de l'écosystème steppique a été pour longtemps assurer par une harmonie très rigide entre l'homme et le milieu dans lequel il vit. Cet équilibre a été à l'origine de pratiques humaines ancestrales qui permettaient d'assurer la régénération des ressources naturelles et donc la durabilité de leur exploitation (Boukhobza, 1982 ; Bédrani, 1995). Les différentes crises qu'a endurées la société pastorale ont provoqué l'apparition de nouvelles pratiques, étrangères au mode de vie des populations steppiques. La croissance démographique combinée au manque de création d'emplois ont provoqué l'augmentation de la pression sur les ressources terre et cheptel, obligée de se créer un revenu pour survivre une grande partie de la force de travail sur les espaces steppiques se tourne vers les activités pour lesquelles elle a quelques compétences et/ou les barrières d'entrées n'existent pas : élever quelques têtes de brebis et de chèvres et défricher un morceau de steppe (Bédrani, 1993). D'autre part pour combler le déficit alimentaire du cheptel causé par la sécheresse, les éleveurs et les agro-éleveurs de la steppe au lieu d'intensifier les cultures fourragères, ont opté pour les céréales par le défrichement des parcours qui sont réputés pour être squelettiques, dont l'effet sur les terres est l'augmentation de leur risque de dégradation par érosion hydrique ou éolienne (Bédrani, 1995). Et donc ce territoire qui fut l'espace du nomadisme et des grandes transhumances, a subi des modifications profondes. La conséquence de ces modifications est une dégradation par érosion de plus en plus importante, et ressentie à tous les niveaux, du territoire steppique (Le Houérou, 1995 ; Nedjraoui et Bédrani, 2008).

L'agriculture en milieu steppique algérien, est caractérisée par sa conduite en pluviale, combinée à l'utilisation de charrues pour labour superficiel consistant à recouvrir les semences jetées sur un sol non préparé. Selon les statistiques (2010) du ministère de l'agriculture, 109.103 ha soit 25 % des terres attribuées dans le cadre du programme de l'Accession à la propriété foncière Agricole se trouvent sur les parcours steppiques. En conséquence la mise en place d'avantages de territoires dénudés de leur végétation naturelle, bien exposés au risque de déflation des matériaux composant les couches superficielles de leurs sols au vent et donc leur dégradation par érosion éolienne.

En Algérie depuis environ une quarantaine d'années, des scientifiques se sont penchés sur les

problèmes qui se posent au niveau des espaces menacés, notamment les couvertures végétales, ainsi que sur les aspects socioéconomiques dans leurs différents systèmes (Boukhobza, 1982 ; Bédrani, 1995 ; Aidoud et Touffet, 1996 ; Le Houérou, 1997 ; Taibi, 1997 ; Khaldoun, 2000 ; Bensaid, 2006 ; Guettouche et Guendouz, 2007).

Cependant, la quantification de la dégradation des espaces steppiques algériens par érosion éolienne n'a été abordée qu'au travers de synthèses climatologiques (Taibi, 1997 ; OSS, 2004 ; Bensaid, 2006 ; Guettouche et Guendouz, 2007) mais sans être allés jusqu'aux mesures des quantités de matériaux de sols en déplacement. En Afrique subsaharienne, plusieurs études sur les transports éoliens ont montré que les champs peuvent être des zones source ou de piégeage de sédiments (Michels *et al.*, 1995 ; Sterk, 1997 ; Biolders *et al.*, 2000,2002 ; Rajot, 2001 ; Rajot *et al.*, 2009 ; Visser *et al.*, 2004 ; Tidjani, 2008). Aussi bien que certaines activités agricoles sur les terres ont révélé différents effets sur les flux horizontaux des sédiments notamment en Tunisie et au Niger (Kardous, 2005 ; Tidjani, 2009).

C'est dans ce contexte de dégradation du sol que ce travail a été entrepris dans la wilaya de Laghouat où le milieu naturel est soumis à une pression anthropique qui ne préserve pas les terres et la végétation d'une dégradation accrue. De par sa position géographique, la wilaya fait partie du groupe des douze wilayat pastorales du pays ainsi que des wilayat du Sud. Sa superficie totale est de 25.052 Km². Selon les chiffres fournis en 2010 par les directions des forêts et de l'agriculture de la wilaya on retrouve environ 1.800.000 têtes d'ovins sur 1.531.126 ha de parcours dont 93.855 ha sont en bon état et 1.035.804 ha sont dégradés soit environ 89% de leur superficie totale et sur le reste de la superficie des parcours sont classés les forêts, les maquis, les mises en défens et les reboisements.

La dégradation du sol dans le cadre qui nous occupe ici est celle que nombreux associent avec désertification. Par désertification, on entend une situation de dégradation des terres, liée au contexte socio-économique de l'utilisation des ressources naturelles au-delà de leur capacité de restauration, aggravée souvent par les fluctuations des conditions climatiques. Elle conduit à un déclin permanent du potentiel biologiques, des rendements des terres, et des activités économiques, enracinant les populations locales les plus vulnérables dans la pauvreté, les poussant à un exode massif (Rapp, 1974 ; Warren et Maizels, 1977 ; Dregne *et al.*, 1991, Mainguet, 1994 ; Bédrani, 1998 ; Mabutt, 1984 ; Benslimane *et al.*, 2008).

La définition ou la présentation de référence à la désertification fut adoptée par la CNUDE

(Conférence des Nations Unies sur le Développement et l'Environnement) à Rio de Janeiro 1992 : « La désertification est la dégradation des terres dans les zones arides, semi arides et subhumides sèches par divers facteurs parmi lesquels les variations climatiques et les activités humaines ».

Comme cela a été évoqué plus haut, en Algérie les espaces steppiques sont ceux qui sont le plus menacés par la dégradation des terres. Ils sont caractérisés par un couvert végétal clairsemé et un climat agressif (Lahmar et Ruellan, 2007), d'un autre côté, ils sont soumis à des pratiques agricoles inadéquates, un surpâturage, une céréaliculture aléatoire et donc une surexploitation par les Hommes (Nedjraoui, 2003 ; Hadeid, 2008 ; Nedjraoui et Bédrani, 2008 ; Bouchetata et Bouchetata, 2011). C'est pourquoi ces espaces cumulent les paramètres favorables à la désertification.

Sur ces territoires de parcours steppiques se trouve aussi 63 % de la superficie de la wilaya de Laghouat (DSA, 2010). Sa vocation pastorale n'épargne pas les terres de la wilaya d'une mise en culture, la direction des services agricoles de la wilaya évoque que jusqu'à 2012 plus de 13.000 ha sont nouvellement défrichés dans le cadre de la (APFA). Et donc les terres des parcours steppiques de la wilaya sont les lieux d'une véritable pression accrue, un surpâturage et des défrichements pour la mise en culture. La mise en culture en pluviale à Laghouat est effectuée avec l'incertitude d'une récolte pouvant contrebalancer les pertes (biodiversité et terres) qui s'en suivent. Selon la présentation attribuée à la désertification de telles pratiques ne peuvent faire que transformer les parcours steppiques de Laghouat en désert. C'est ce cadre de désertification ou de dégradation des terres qui nous intéresse ici.

Dans la présente thèse est reproduite cette pratique culturelle très répandue dans la steppe algérienne depuis plusieurs décennies : un sol de parcours steppique a été débarrassé de sa couverture végétale naturelle, défriché et cultivé sans apports de fertilisants en céréale (*Hordeum Vulgare*) en pluviale.

Le but exact de la thèse est de quantifier l'érosion éolienne du sol du pâturage steppique converti en terre cultivée en pluvial. Un autre sous objectif est associé au travail, il vise l'analyse de l'état de la surface du parcours converti en terre cultivée.

La thèse se présente en quatre chapitres en plus de l'introduction générale et des conclusions générales et perspectives. Le premier et le deuxième chapitre décrivent respectivement le

contexte global de l'étude et le cadre physique de l'étude (wilaya de Laghouat), le troisième chapitre est consacré à la quantification de l'érosion éolienne dans la région de Laghouat et dans le quatrième chapitre nous présentons une analyse du pâturage de la steppe lieu de l'étude en Algérie.

Chapitre 1

Dégradation des terres et érosion éolienne

1. Dégradation des terres à l'échelle de la planète et en Afrique

Les zones sèches occupent 41,3% de la surface terrestre. La population totale dans ces zones s'élève à 2,1 milliards d'habitants, ce qui représente une personne sur trois dans le monde. Le taux de croissance démographique dans ces zones (18,5%), est le plus rapide que celui de toute autre zone écologique. La densité de la population augmente à mesure que l'aridité diminue dans les zones sèches. Elle varie de 10 habitants au kilomètre carré dans les zones arides, à 71 habitants au kilomètre carré dans les régions subhumides sèches. Dans ces zones trois grands domaines d'activités se distinguent (FEM, 2010 ; CSFD, 2002).

- Zones pastorales
- Zones de cultures pluviales
- Zones de cultures irriguées

Jusqu'à 44 % des systèmes cultivés du monde sont situés dans les zones sèches. Les pâturages de ces zones font vivre 50 % du cheptel mondial. L'élevage est la production dominante des zones les plus arides. Les terres cultivées dominent dans les zones sub humides sèches (UNCCD, 2009). Ces diverses activités provoquent une pression sur les terres et menacent les moyens de subsistance de plus de 1 milliard de personnes vivant dans quelque 110 pays. Environ 70 % des superficies dans ces pays, soit 3592 millions d'hectares seraient affectés de dégradation (Tableau 1) sévère à modérée (Katyal et Vlek, 2000 ; IFPRI, 2009 ; UNCCD, 2009).

Tableau 1. Importance de la dégradation des terres par grande zone d'activité dans le monde.

	Cultures pluviales	Cultures irriguées	Pâturage
Surface totale (Mha)	457	145	4556
Surface dégradée (Mha)	216	43	3333

(Source : Katyal et Vlek, 2000)

L'évaluation de la dégradation des terres est très complexe, de nombreux indicateurs ont été élaborés mais, faute de moyens peu sont utilisés (Cornet, 1996 ; Dregne, 2002). Parmi les indicateurs de la dégradation des terres l'évolution de la productivité d'un milieu a permis de caractériser les états de dégradation allant d'une situation réversible à une situation irréversible avec des stades relativement intermédiaires.

Selon FAO (2011), 25% des terres dans le monde sont dans un état de dégradation extrême, 8 % sont modérément dégradées, 36 % sont stables ou légèrement dégradées et 10 % sont en cours de restauration. Le reste de la superficie terrestre est constitué soit de terres nues (18 % environ) et de plans d'eau continentaux (2 % environ). 99% de l'alimentation humaine provient des terres et uniquement 1 % provient des écosystèmes aquatiques et marins. D'ici 2050, la population de la planète devrait dépasser 9 Milliard d'habitants, avec une hausse de 60 % de la demande de nourriture, de fourrage et de fibres, cela exacerbera aussi la pression sur les ressources en terres.

C'est en Afrique que la dégradation des terres est la plus accentuée (Mainguet, 1994 ; Dregne, 1990 ; 2002), plus de 45 % des terres du continent soit 75 Mha sont touché par le phénomène, dont 55 % à un niveau élevé ou très élevé représentant la moitié des terres dégradées de la planète. 2/3 des terres arables africaines pourraient disparaître d'ici 2025 si cette tendance se confirme (CNUDD, 2012). Ce continent abrite également la moitié des habitants du monde menacés par le phénomène de la dégradation des espaces et de la pauvreté (FAO, 2011).

1.1. Formes et processus de la dégradation des terres

Les processus et les formes de la dégradation des terres diffèrent selon la nature des activités humaines pratiquées et le mode d'exploitation de l'espace considéré dont les effets néfastes peuvent être accentués par la péjoration des conditions climatiques.

Le phénomène de la dégradation des terres résulte de processus physiques, chimiques et biologiques en interactions qui affectent leur productivité et diminuent leur fertilité.

La forme la plus commune et la plus répandue de la dégradation des sols est l'érosion. Elle provoque un tri sélectif des matériaux déplacés en entraînant préférentiellement les particules les plus fines du sol. L'érosion peut être d'origine hydrique ou éolienne. D'autres formes de la dégradation des terres se manifestent par la salinisation, l'acidification et la pollution c'est le cas de la détérioration chimique des sols. Comme elle peut se manifester par la compaction des sols représentant ainsi leur détérioration physique.

L'érosion affecte à la fois les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques des sols. Bien que ce processus soit à l'origine de la formation de nombreux sols sur la planète, il devient accéléré par l'intervention de l'Homme. Les pertes en terres par érosion sont vingt à quarante fois supérieures au rythme de la formation des sols (Steiner, 1996).

L'érosion est responsable de la dégradation de 87 % des terres à l'échelle du globe et de 88 % des terres en Afrique (Tableau 2), et c'est l'érosion éolienne qui se manifeste le plus, le processus est majeure dans la dégradation des terres en Afrique (Dregne, 2002). En effet, nombreux auteurs ont mis en évidence l'intensité du processus de l'érosion éolienne et sa contribution dans la dégradation des espaces en Afrique : La concentration en poussières dans l'atmosphère constatée durant ces dernières décennies est une preuve de l'activité éolienne dans les zones subsahariennes (Ozer, 2001). Les pertes en terres, en nutriments et l'ensablement dans les zones agricoles reflètent bien l'effet conjugué du vent et des pratiques humaines sur les terres aboutissant à la réduction des espaces productifs et enfonçant davantage les populations de l'Afrique dans la pauvreté (Skidmore et Hagen, 1977; Mainguet et Chemin, 1978 ; Michels *et al.*, 1995 ; Sterk et Stein, 1997 ; Biielders *et al.*, 2004 ; Ozer *et al.*, 2005 ; Leenders, 2006 ; Rajot *et al.*, 2003 ; 2009 ; Tidjani, 2009 ; Leenders *et al.*, 2011 Touré, 2011).

Tableau 2. Répartition des superficies affectées par la dégradation des terres (Mha)

	Erosion		Dégradation		Total
	Hydrique	Eolienne	Physique	Chimique	
Monde	467	432	100,6	34,7	1034,3
Afrique	119	160	26,5	13,9	319,4

(Source : UNEP ; 1992)

2. La dégradation des terres en Afrique du Nord et ampleur de l'érosion éolienne

L'Afrique du Nord, l'ensemble géographique des pays de la rive sud méditerranéenne. Entre 55 et 100% des superficies dans ces pays se situent dans les étages climatiques arides et semi arides (UNEP, 2003). Les pays nord africains abritent des populations pastorales et agropastorales en accroissement continu, et dans lesquels les terres connaissent une gestion caractérisée par un surpâturage et des défrichements inconsidérés de zones plus ou moins vastes (Bédrani, 1994 ; Dregne, 2002). L'Afrique du Nord, a aussi connu durant son histoire de nombreuses sécheresses d'ampleur variable, certaines ont eu des répercussions dramatiques sur les populations. A partir de 1980, les pays nord africains ont connu une diminution des précipitations de l'ordre de 25 à 50 % (Dregne, 1990). Ceci explique l'ampleur du phénomène de la dégradation des terres dans ces pays par référence à la définition attribuée à la désertification par CNUED (1992). L'extension irréversible des paysages dégradés, résulte donc de la combinaison d'une cause physique (la sécheresse) et d'une cause biologique d'origine anthropique, la surexploitation de la végétation et des terres par l'Homme (Dregne, 2002 ; UNEP, 2003). Le Maroc est le pays de l'Afrique du nord le plus affecté par la dégradation avec 87,8 % de terres de ses zones sèches, suivi en deuxième position par l'Algérie avec 84,7 % de ses terres dans les zones semi arides et arides représentant les parcours steppiques du pays (Tableau 3).

Tableau 3. Proportion des terres des zones semi arides et arides de l'Afrique du nord affectées par la dégradation

Pays	(%) des terres affectées par la dégradation
Maroc	87,8
Egypte	54,6
Soudan	63,8
Tunisie	73,4
Algérie	<u>84,7</u>
Libye	78,1

(Source : Lal, 2002)

Le surpâturage est responsable de la dégradation de 52,2 % des terres, la déforestation cause la dégradation de 16,6 % des terres, la mauvaise utilisation des espaces pour les cultures provoque la dégradation de 8,1 % des terres et d'autres causes sont à l'origine de 23,1% des terres dégradées en Afrique du Nord (Le Houérou, 1991).

Selon Dregne (1983), les taux de dégradation des terres de l'Afrique du nord sont 85%, 75% et 40 % respectivement pour les terres de parcours, des cultures pluviales et des cultures irriguées. On suppose qu'actuellement, ces taux seraient davantage plus élevés en raison de l'accroissement démographique que connaît la région. Le Houérou (1991) a souligné qu'en Afrique du nord les espaces des parcours régressent au profit de l'extension des cultures, et ce sont des terres pauvres et exposées à l'érosion qui sont généralement le plus mises en cultures.

Les multiples activités humaines en Afrique du nord sont en faveur de tous les processus responsables de la dégradation des terres, toutefois c'est l'érosion éolienne qui domine avec plus de la moitié de responsabilité (Tableau 4).

Tableau 4. Importance relative des superficies atteintes par diverses formes de dégradation des terres (semi arides et arides) nord-africaines

Formes de dégradation	Terres dégradées en (%)
Erosion hydrique	28,4
Erosion éolienne	51,1
Dégradation physique	10,3
Dégradation chimique	11,2

(Source : Le Houérou, 1995)

L'érosion éolienne en Afrique du nord se produit essentiellement lorsque le taux de recouvrement pérenne en canopée descend en dessous d'un seuil critique de 20 à 25 % et c'est le cas de nombreux espaces steppiques (Le Houérou, 1995). Des études détaillées par utilisation d'images satellitaires, de photographies aériennes et de relevés au sol ont montré en Tunisie l'ampleur du processus de l'érosion éolienne dans la formations de regs dénudés et de champs de dunes, les espaces se dégradent avec un taux annuel de 0,7% (Long *et al.*, 1978 ; Escadafal, 1989 ; Escadafal *et al.*, 1994 ; Khatteli et Gabriel, 1998 ; Jauffret, 2001). Le dénudement mesuré dans des steppes sableuses dans le sud de la Tunisie estime aussi d'importante pertes de terres par érosion éolienne pouvant dépasser les 150 t/ha/an (Floret et Pontanier, 1982 ; Khatteli, 1983 ; Le Houérou, 1991). En Algérie, ce sont les terres de la steppe qui sont le lieu d'un processus de dégradation, le surpâturage et une agriculture inadaptée en sont à l'origine (Benchetrit, 1972 ; Nedjraoui et Bédrani, 2008 ; HCDS, 2010 ; OSS, 2012 ; Khaldi, 2014). Le rôle du vent est prépondérant dans la morphogenèse des paysages désertique dans zones semi arides à l'Ouest de l'Algérie (Benazzouz, 2000). L'utilisation d'images satellites a permis de montrer l'effet du vent dans la dégradation, en façonnant de nouveaux paysages par dénudement ou ensablement dans les zones fragiles du pays (Taibi, 1997 ; OSS, 2004 ; Oussedik *et al.*, 2003 ; Bensaid, 2006). Le risque d'érosion éolienne des sols cultivés est extrêmement grand dans les régions semi arides de l'Est de l'Algérie, il est estimé à plus de 700 t/ha /an (Guettouche et Guendouz, 2007). Au Maroc on estime une régression du couvert végétal de 31.000 ha/an, l'érosion hydrique est intense avec des dégradations spécifiques dépassant 20 t/ha /an dans les versants du Rif au Nord du pays, entre 10 et 20 t/ha /an dans le pré Rif, entre 5 et 10 t/ha /an dans les Moyen et Haut Atlas et moins de 5 t/ha/an dans les autres régions. La salinisation touche près de 414.000 ha de terres irriguées du Maroc (Aziki, 2003 ; Ghanem, 2003), le phénomène d'ensablement prouve d'une activité éolienne est spectaculaire dans les régions Est du pays, le vent est à l'origine d'une

dégradation intense du milieu avec les frontières de l'Algérie (Alali et Benmohammadi, 2013 ; Fikri Benbrahim *et al.*, 2004 ; Benmohammadi, 2000). La couverture végétale dans les parcours marocains connaît une réduction annuelle de l'ordre de 2,7 % à 3% (Mahyou et *al.*, 2010). En Égypte, environ 1/3 de la population active est engagée dans le secteur agricole, toute cette main d'œuvre opère dans la vallée du Nile et dans le Delta (sur environ 2,5 million d'hectares) (UNCCD, 2005). Cette pression sur la terre provoque une dégradation chimique qui touche 15 % des terres cultivées et aussi 8% des terres cultivées sont affectées de dégradation physique. Les estimations des pertes en terres par érosion éolienne dans les zones des cultures pluviales sont variables de 71 à 100 t/ha/an sur la côte nord-ouest de l'Égypte (Gabber, 2002 ; Wassif, 2002).

3. Quantification de l'érosion éolienne

La dégradation des terres par le vent à l'échelle mondiale a stimulé les études sur les transports éoliens. Le transport des particules du sol est observable dans la nature lors des tempêtes de sables. (Bagnold, 1941) fut l'un des pionniers à établir les bases des phénomènes éoliens. Il réalisa en soufflerie des expérimentations qui lui ont permis de caractériser le transport par le vent depuis la mise en mouvement des particules jusqu'à leur état d'équilibre.

3.1. Les forces intervenant dans le processus de l'érosion éolienne

Le processus d'érosion éolienne requiert l'application d'une force mécanique exercée par le vent supérieure aux forces de résistance du sol (figure 1). Il a pour conséquence l'entraînement, le détachement, le transport et le dépôt de sédiments (figure 2). Ces mécanismes dépendent de la taille des particules et des interactions entre la vitesse d'écoulement du vent (Cooke *et al.*, 1993).

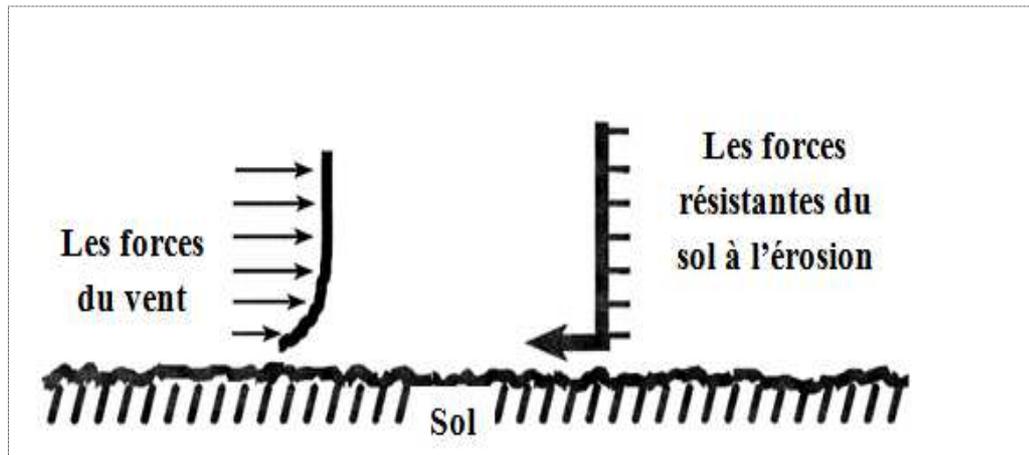


Figure 1. Les forces intervenant dans le processus de l'érosion éolienne.

Si les forces exercées par le vent excèdent les forces de résistance du sol, l'érosion éolienne aura lieu. Par ailleurs si les forces du vent sont en dessous ou égales aux forces de résistance du sol l'érosion ne se produira pas, et probablement un dépôt de sédiment aura lieu si le vent en contient (Fryrear *et al.*, 1998b).

3.1.1. Les forces d'entraînement des particules

Les forces d'entraînement des particules sont

- **les forces de cisaillement** : l'air applique une pression sur le sol avec lequel il est en contact. Lors de son déplacement, en tant que fluide, la couche d'air en mouvement exerce une force supplémentaire de friction et agit sur le sol de manière non perpendiculaire. Cette force de cisaillement peut être exprimée en terme de vitesse de friction (u_*).

- **les turbulences** : ne constituent pas une force en tant que telle. Elles créent des fluctuations (direction et intensité) et font vibrer les particules qui sont alors plus vulnérables à l'entraînement par le vent (Bisal et Nielsen, 1962 ; Lyles et Krauss, 1971). Les particules du sol sont maintenues d'une part par la force gravitationnelle et d'autre part par la cohésion du sol.

3.1.2. Les forces de détachement des particules

Le vent exerce des forces de cisaillement (drag) et de levée (lift) pour vaincre les forces gravitaires et la cohésion du sol, et ainsi mettre les particules en mouvement (Figure 2). Le

détachement des particules se produit lorsque la vitesse du vent critique de soulèvement du sol (seuil statique) est dépassée. Celle-ci augmente à la fois pour les particules fines à cause de leur cohésion, mais également pour les particules plus grossières à cause de leur poids. Ces forces sont au nombre de deux : la trainée et la levée.

Le bombardement peut alors commencer et poursuivre le détachement des particules. Notons que les phénomènes de levée et de traînée sont négligeables une fois que le bombardement commence.

- la levée (lift) (Figure 2)

La levée est une force verticale, perpendiculaire à la direction du vent, causée par une différence de pression entre la base et le sommet des grains. Selon le principe de Bernoulli, une vitesse importante sur la face supérieure a pour résultat une pression négligeable alors que, sur la face inférieure. Une vitesse réduite crée une pression prédominante (Shao, 2000). En 1962, Bisal et Nielson a démontré qu'une accélération du vent près de la surface des particules initiait leur vibration et accentuait leur vulnérabilité à l'entraînement. La levée s'observe lorsque la force la force d'aspiration est supérieure aux forces d'inertie des particules.

- la traînée (drag) (Figure 2)

C'est une force horizontale, parallèle à la direction du vent, causée par un flux de l'air sur la particule. Elle est composée de deux types :

La traînée de surface correspond à la friction appliquée directement par l'air en contact avec la particule. La traînée de surface étant plus importante sur le sommet des particules, celle-ci induit un basculement et un roulement des particules les plus lourdes (Cooke *et al.*, 1993).

La traînée de forme correspond à la séparation du flux et des turbulences. Elle a pour effet la création d'une différence de pression entre la face de la particule exposée. La traînée est le premier mouvement observée lors d'un mouvement venteux (Willet, 1983).

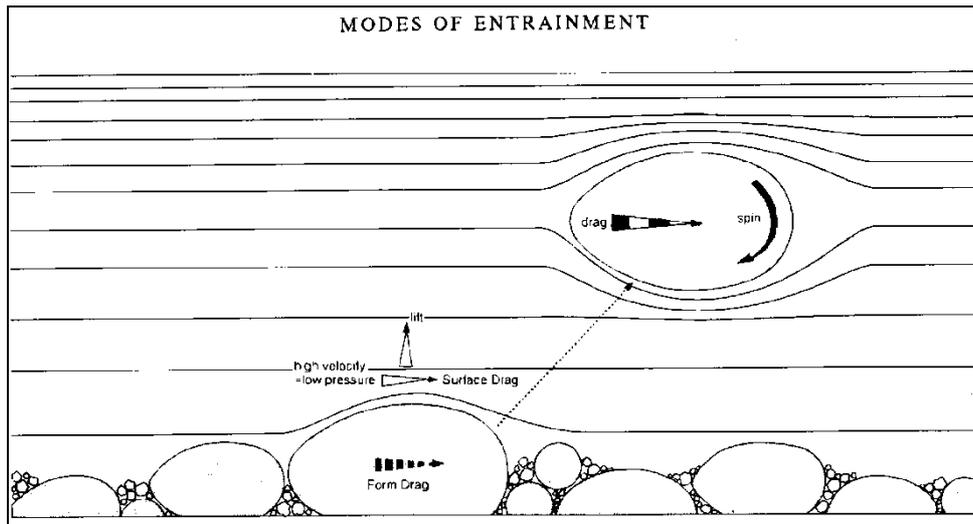


Figure 2. Modes d'entraînement des particules, lift (levée), drag (trainée), (Source : Cooke et al ; 1993).

- le bombardement

Après la mise en mouvement initiale des particules, le bombardement devient le principal responsable du détachement.

Ce phénomène se produit lorsque le vent transporte un grand nombre de particules et que la vitesse à proximité du sol décline (Shao *et al.*, 1993). L'entraînement de matière est alors presque entièrement réalisé grâce à l'énergie acquise par les sables en mouvement. Ces particules redescendent des couches d'air supérieures et provoquent des éjections lors de leur impact hautement énergétique (Cooke *et al.*, 1993).

La traînée est le premier mouvement observé lors d'un événement venteux (Willet, 1983). Dès que le vent rencontre une plage sableuse, la transition vers l'entraînement par bombardement est presque immédiate (Bagnold, 1943).

3.1.3. Le forces de transport des particules

Si l'on considère une zone où l'érosivité est constante et l'apport en sédiments nul, un rapport peut être établi entre le détachement et la charge en sédiments. Le détachement se fait, à l'origine, par le biais des forces de cisaillement et, ensuite, grâce au saut des particules. Lorsque le vent atteint sa capacité maximale de transport, le phénomène de détachement est réduit et la charge de sédiments en mouvement est maximale (Toy et al, 2002).

Bagnold (1941) a identifié trois grands types de mouvements des particules en fonction des

forces mises en jeu, de la vitesse du vent et de la taille des particules : la suspension, la reptation et la saltation (Figure 3). Selon USDA-NRCS (2002), Lyles et Krauss (1971) et Chepil (1945), les proportions de matière mises en mouvement varient de 50 à 75 % pour la saltation, 5 à 25 % pour la reptation et 3 à 40 % pour la suspension. La vitesse nécessaire pour maintenir en mouvement une particule est appelé le seuil dynamique (Chepil, 1945 ; Bagnold, 1943) et est inférieure au seuil statique.

- **La suspension** concerne les particules les plus fines dont la limite de taille varie de 70 μm (Shao, 2000) à 100 μm (USDA, 2002). Ces particules seront transportées dans l'atmosphère sur des distances pouvant atteindre quelques centaines de kilomètres (Shao, 2000). Les particules plus fines ($< 20 \mu\text{m}$), quant à elles, suivent les courants ascendants de l'air et sont entraînées par la circulation atmosphérique sur des milliers de kilomètres (Shao, 2000). En opposition, les particules plus larges ont une vitesse de sédimentation supérieure (Gillette et Walker, 1977).

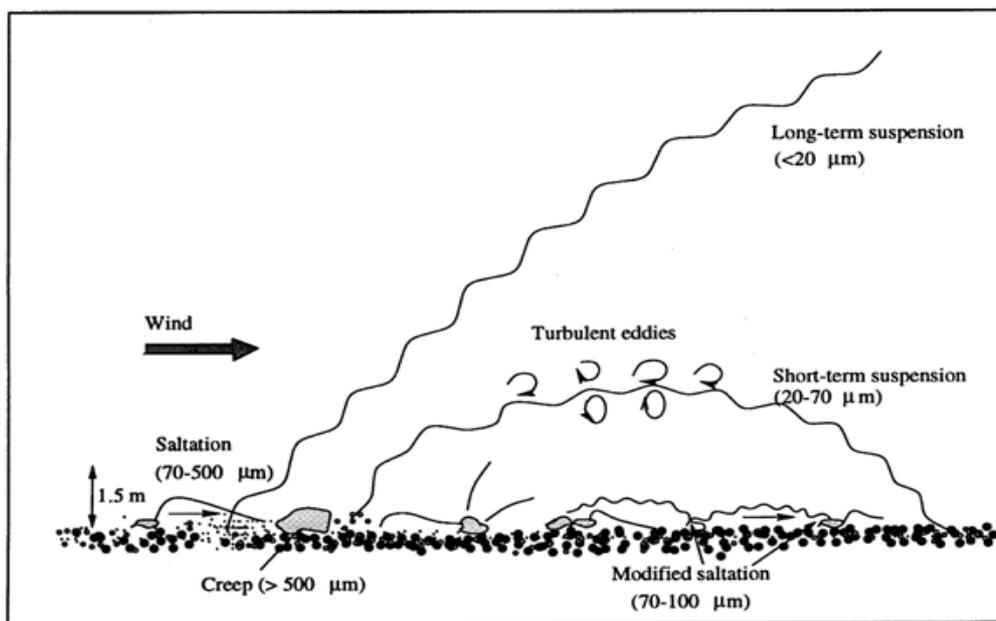


Figure 3. Illustration des modes de transport pendant un évènement érosif : la saltation, la reptation (creep), et de la suspension, (Source : Shao, 2000).

- **La saltation** est un déplacement par bonds successifs des particules dont le diamètre varie de 100 à 800 (USDA-NRCS, 1961). La vitesse acquise par un grain retombant initie le décrochage d'un autre grain et facilite son emportement par le vent. Un bond peut atteindre une hauteur maximale d'environ 1 m (Sterk, 1997) et couvrir une distance de quelques millimètres à quelques mètres. Cependant La plupart de la saltation s'effectue dans les 30

premiers centimètres (Hagen and Lyles, 1988) par bonds successifs. Ce transport concerne les particules de 80 µm à 1000 µm est de loin le plus important et entraîne le déplacement de larges quantités de sable.

- **La reptation** (creep), concerne les particules d'une taille supérieure à 1000 µm. Celles-ci sont poussées par le vent ainsi que par l'impact des particules en saltation.

3.1.4. La sédimentation ou dépôt des particules

Le dépôt ou bien la sédimentation des particules déplacées se produit quand la charge en sédiments excède la capacité de transport à un endroit et un moment donnés. Par exemple, un brise-vent diminue la capacité de transport et provoque donc une sédimentation. C'est un processus sélectif qui dépend du poids et de la taille des sédiments où les plus grandes particules sont déposées en premier (Toy et *al.*, 2002).

3.2. La vitesse du vent

3.2.1. Le profil de la vitesse du vent

La force de friction s'exprime par la contrainte tangentielle (τ) exercée par le vent sur

Le sol. Dans la couche limite de surface et pour des conditions de neutralité thermique, Priesley (1959), en partant de la loi de Von Karman (1934) pour les fluides incompressibles, a établi un lien entre la contrainte de cisaillement (τ) d'une part et la vitesse du vent $u(z)$ mesurée à la hauteur (z) et la hauteur de rugosité aérodynamique (z_0) d'autre part (Equation.1).

$$u(z) = \frac{\sqrt{\tau}}{k} \cdot \ln \frac{z}{z_0} \quad \text{Equation 1}$$

Où :

$U(z)$ est la vitesse du vent ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) à la hauteur z (m) ;

z_0 , est la hauteur de rugosité aérodynamique.

k : est la constante de Von Karman pour les flux turbulents comprise entre 0,35 et 0,4 (adimensionnelle) ;

Le rapport $\sqrt{\frac{\tau}{\rho_{air}}}$: est une grandeur qui désigne la vitesse de friction de surface et notée (u_*) ($m.s^{-1}$). Ce terme sera d'autant plus élevé si la rugosité du sol est importante (Blumberg et Greeley, 1993).

La hauteur de rugosité aérodynamique Z_0 correspond à la hauteur théorique à laquelle la vitesse du vent s'annule (Figure 4). Cette hauteur où la vitesse du vent est nulle varie en fonction de la hauteur, de la morphologie et de la densité des plantes mais aussi en fonction de la rugosité du sol (Cooke *et al.*, 1993). Ce terme renseigne donc sur l'érodibilité du sol, celui-ci sera d'avantage résistant si Z_0 est important (Blumberg et Greeley, 1993).

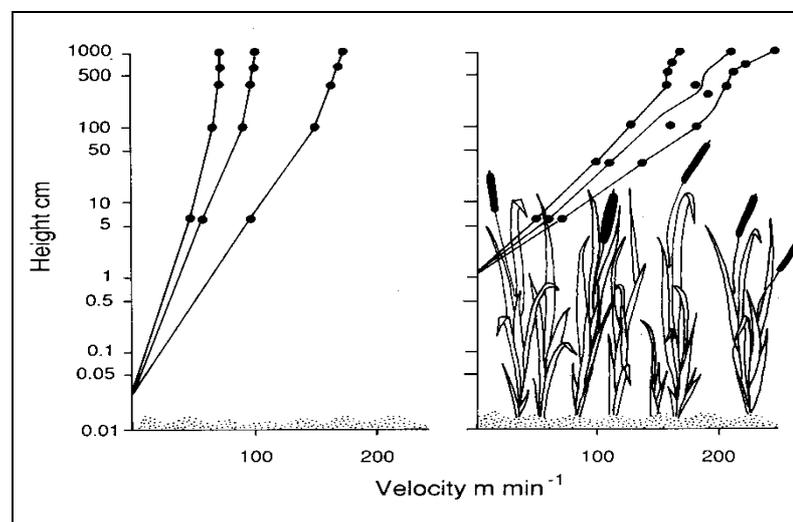


Figure 4. Variation de la hauteur de rugosité aérodynamique en fonction la couverture du sol (rugosité), (Source : Cooke *et al.*, 1993).

3.2.2. La vitesse seuil de l'érosion éolienne

La vitesse seuil d'érosion est un paramètre difficile à mesurer sur le terrain. Elle correspond théoriquement à la vitesse du vent pour laquelle les premiers grains de sable se mettent en mouvement à la surface du sol. La mise en mouvement des particules a lieu quand les forces aérodynamiques (force d'entraînement et force de soulèvement) sont suffisamment fortes pour vaincre les forces de résistance et donc pour déloger les particules solides érodables du sol et initier leur mouvement. La force de soulèvement résulte de l'important gradient de la vitesse du vent au voisinage de la surface du sol (Zingg, 1953), les forces de résistance dépendent de la nature du matériau mis en mouvement. A partir des études de ces forces, l'expression de la vitesse seuil du mouvement des particules (Equation 2) fut établie pour des

grains de sables (en saltation) de tailles supérieures à 100 µm par (Bagnold, 1943 et Chepil, 1945).

$$u_{*t} = A \cdot \sqrt{\left[\left(\frac{\rho_p - \rho_{air}}{\rho_{air}} \right) \cdot g \cdot D_p \right]} \quad \text{Equation 2}$$

u_{*t} : vitesse de friction seuil (m.s-1) ;
A : coefficient empirique sans dimension ;
 ρ_p : masse volumique de la particule du sol (kg.m-3) ;
 ρ_{air} : masse volumique de l'air (kg.m-3) ;
 D_p : diamètre de la particule (m).

3.3. Le flux de masse horizontal

(Bagnold, 1941) mit au point une formulation du flux horizontal (Equation 3) qui correspond à la masse totale de particules traversant par unité de temps une surface verticale, perpendiculaire au sens de l'écoulement du vent, de hauteur infinie et de largeur unité. Le flux *Q* de Bagnold (1941) essentiellement constitué par les particules mobilisables en reptation et en saltation.

$$Q = \frac{3}{4} \cdot C \cdot \frac{\rho_{air}}{g} \cdot u_*^3 \quad \text{Equation 3}$$

Q : flux exprimé en g.cm⁻¹.s⁻¹ ;
C : coefficient adimensionnel qui dépend de la taille des grains ;
 ρ_{air} : masse volumique de l'air g.cm⁻³ ;
g : accélération de la pesanteur cm.s⁻² ;
 u_* : vitesse de friction du vent cm.s⁻¹.

Les flux d'air et les processus de détachement ont une complexité et une dynamique très changeante au cours des tempêtes. Sur la base de l'équation de Bagnold (1941) d'autres équations modèles pour l'estimation du flux horizontal des particules ont été par la suite établis par de nombreux auteurs (eg ; Kawamura, 1951 ; Zingg, 1953 ; Dyunin, 1954 ; Kuhlman, 1958 ; Owen, 1964 ; Maegley, 1976 ; Radok, 1977 ; Lettau & Lettau, 1978 ; Lyles *et al.*, 1979 ; Takeuchi, 1980).

3.4. Interactions entre les différents modes et taux de transport

La vitesse de vent requise pour faire bouger les particules les moins stables s'appelle le seuil statique. Si la vitesse augmente, le mouvement de sol commence et si la vitesse est suffisante,

celui-ci est maintenu. Cette vitesse nécessaire pour maintenir le mouvement est appelé le seuil dynamique (qui est inférieur au seuil statique) (Chepil, 1945 ; Bagnold, 1953). A une large échelle, en considérant un champ où l'érosivité est constante et avec une charge en sédiments nulle à son entrée, la (figure 5) donne la relation entre le détachement et la charge en sédiments. A l'entrée, le détachement se fait via les forces de cisaillement. Il continue à augmenter sous l'action de la saltation des particules pour atteindre un maximum avant de décroître petit à petit en même temps que la charge en sédiments augmente pour atteindre la capacité maximale de transport pour un vent (Toy et al, 2002).

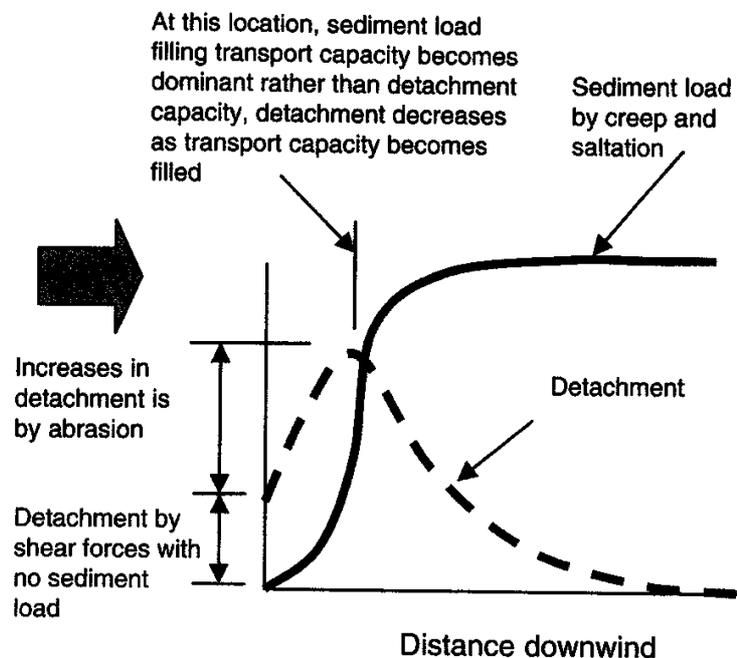


Figure 5. Relation entre le détachement et la charge en sédiments (Source : Toy *et al.*, 2002).

3.5. Facteurs influençant l'érosion éolienne

(Fryrear *et al.*, 2000) considèrent 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.

3.5.1. 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 des événements venteux. Tel que démontre par Butterfield (1991), une turbulence se traduisant sous forme de vents irréguliers accentue le transport de sable dans un tunnel à vent par rapport à un phénomène régulier de vitesse moyenne équivalente.

Il est indirectement fonction des autres paramètres climatiques tels que la pluie, la rosée, le brouillard. Ceux-ci, par leur action humidificatrices, 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.

La température de l'air, couplée aux précipitations, définit l'évaporation (Shi, 2004) 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.

3.5.2. 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. Les principaux facteurs qui l'influencent sont les suivants :

- l'état de surface du sol

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 (Rognon, 1987).

La présence d'une pellicule de battance ou de pierres amoindrit la possibilité de l'érosion éolienne. Dans le cas des sols sableux, cependant, une nouvelle couche aérodynamiquement plus lisse (formée par des gouttes d'eau ou le phénomène de saltation) peut avoir l'effet

inverse. En effet, la cohérence des agrégats s'en trouve réduite et l'entraînement des grains de sable est facilité. Si le ratio entre la couverture caillouteuse et la surface est supérieur à 0.1, L'érosion éolienne est fortement diminuée (Cooke *et al.*, 1993).

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.

- la texture

Aussi désignée sous le terme de granulométrie est définie comme étant la proportion des particules minérales de différentes tailles qui composent le sol. 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 (Chepil, 1955b ; Toy *et al.*, 2002). En contrepartie, des sols limono-sableux (10-100 μm) n'ont qu'une faible cohésion (Bagnold, 1943). De plus, tous les agrégats ou particules qui ont une taille inférieure à 840 μm sont considérés comme érodibles (Chepil, 1962).

- la structure des sols

Moins les sols comportent en surface de substances améliorant la structure telles que matières organiques et calcaires, et plus ces sols sont fragiles (Chepil, 1945). 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.

Le sol est un ensemble de particules de forme, de densité et de taille différentes. La stabilité structurale d'un sol est définie comme sa capacité à conserver son arrangement entre les particules solides et les vides lorsqu'il est exposé à des contraintes (Kay et Angers, 1999).

Une stabilité structurale élevée facilite la croissance des plantes en maintenant les espaces poreux au sein du sol et diminue la vulnérabilité du sol à l'érosion. Selon Chepil (1962), tout agrégat ou particule de taille inférieure à 840 μm est considéré comme érodible.

Un contenu élevé en matière organique favorise la formation d'agrégats (Chepil, 1951 ; Chepil et Woodruff, 1963 ; Lynch et Bragg, 1985 ; Tisdall et Oades, 1982). DU point de vue physique, la matière organique structure le sol, le stabilise, amoindrit la compaction et favorise la rétention d'eau (Soane, 1990). Au niveau chimique, elle accroît la capacité d'échange canonique du sol et fournit les plantes en éléments nutritifs (Bonneau et Souchier, 1979). Oades (1993) 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 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.

- la teneur en eau du sol

Elle 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 (Wilson et Cooke, 1980). Chepil (1956) 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 (Logie, 1982). De nombreuses études portent sur le sujet avec chacune leur approche et leurs limites.

-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 (Biolders *et al.*, 2004). 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. 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.

-les activités humaines

Les méthodes d'exploitation déterminent en partie la vulnérabilité à l'érosion. En effet, (Middleton et Thomas, 1997) 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 CO₂ dans le sol (Chevrier et Barbier, 2002 ; FAO, 2011). Des résidus de culture fichés dans le sol peuvent ralentir la vitesse du vent et s'opposer à la mobilisation des particules de sols.

Chapitre 2

Cadre physique de l'étude, la région de Laghouat

1. La wilaya de Laghouat position et situation géographique

La wilaya de Laghouat issue du découpage administratif de 1974 occupe une position centrale en Algérie reliant les hauts plateaux avec le Sahara, elle est aussi l'un des passages obligés pour les caravanes qui vont de l'Afrique noire vers la Méditerranée. La wilaya couvre une superficie totale de 25.052 km² et fait partie du groupe des 12 wilayas steppiques du pays ainsi que des wilayas du Sud. Elle est limitée au Nord et à l'Est par la wilaya de Djelfa, au Nord Ouest et à l'Ouest par les wilayas de Tiaret et d'El Bayadh et au Sud par la wilaya de Ghardaïa (Figure 6).

La wilaya compte 24 communes parmi lesquelles 09 sont considérées comme communes urbaines. La ville chef lieu de wilaya porte le même nom Laghouat, et est située (33°48'N, 02°53'E) à 370 km au Sud d'Alger sur la route nationale N°1 en direction du grand Sud, par cette position elle constitue la porte centrale du Sahara. La région de Laghouat est localisée dans une région de transition sur plusieurs plans. Physique, avec le passage entre les structures plissées de la chaîne Atlasique et les hamadas et le socle saharien. Climatique ensuite entre les hautes steppes arides et les espaces sahariens. Transition humaine entre une zone Nord peuplée et une zone Sud à faible densité de population.

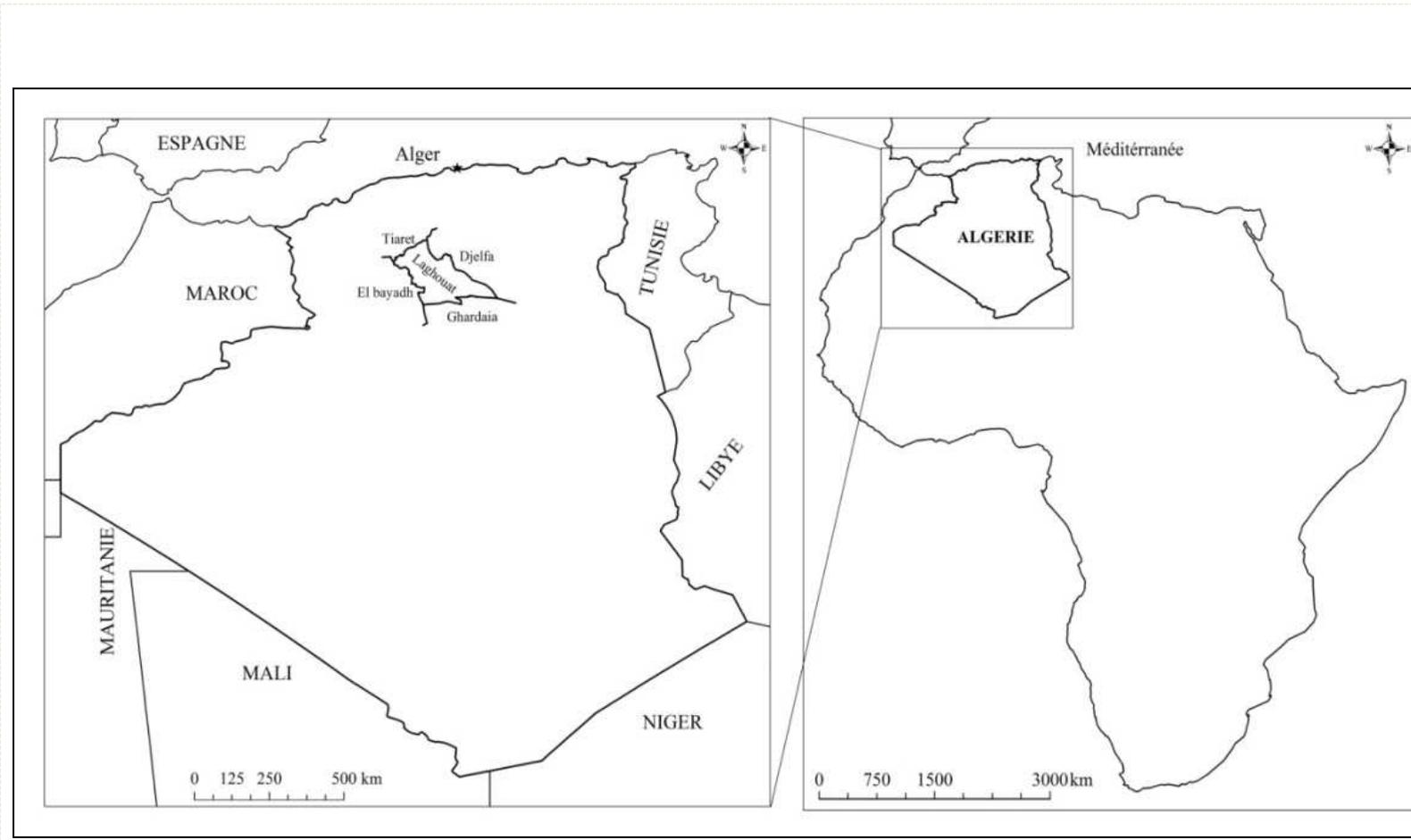


Figure 6. Situation géographique de la wilaya de Laghouat.

2. Cadre Géologique de la wilaya de Laghouat

Le territoire de la wilaya de Laghouat s'étend sur deux domaines géologiques nettement différents, notamment sur le plan de la structure et de l'évolution (Perron, 1883 ; Ritter ,1902 ; Emberger, 1960 ; IAP, 1972 et Hannachi, 1981), ces domaines sont :

- L'Atlas Saharien au nord, formé par les monts des Ammours et les monts des Ouled Nails ;
- La plate forme Saharienne au Sud, formée par un ensemble de plateaux subtabulaires diversifiés selon leurs structures, leurs positions et la nature de la roche qui les constituent. Ces plateaux sont communément désignés par les noms arabes (Hmada et Erg).

La description géologique de la wilaya de Laghouat effectuée par ces auteurs a permis d'attribuer les formations de la région au **Mésozoïque et au Tertiaire Quaternaire** (Figure 7), on distingue :

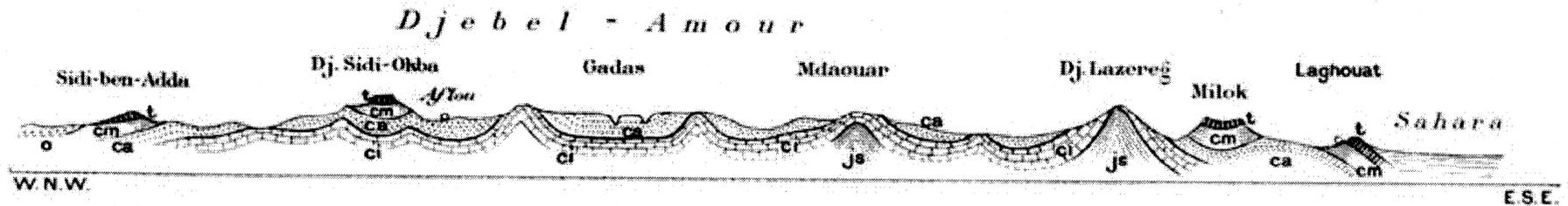
Le trias : n'apparaît qu'à la faveur de quelques accidents locaux, observables dans la région Nord Ouest de la wilaya.

Le Secondaire : est représentée par le Jurassique qui n'est observable que dans sa partie supérieure au cœur d'anticlinaux (Djebels et Kefs) à allongement Sud-Ouest Nord- Est dans la région Nord de la wilaya, tels que le Djebel Lazreg, le Djebel Zerga, le Djebel Zlarh, et la partie oriental du Djebel Mimouna.

Le Tertiaire : est surtout formé par le Crétacé qui couvre la majeure partie de la wilaya. Le crétacé inférieur surtout gréseux occupe de vastes dépressions entre les anticlinaux. Le crétacé supérieur évaporitique et carbonaté constitue l'essentiel des synclinaux perchés en « Tabula », dans le Djebel Milok, le Dakhla, le Djebel Gourou, le Sidi Okba au nord Ouest de la wilaya.

Le Quaternaire : représenté par la Haute Surface et par un système de glacis (Moulouyens). Constitué de terrains qui comprennent des dépôts d'origines très diverses. Il en est de formation marine, d'autres de formation lacustre, de formation fluviale ou de formation continentale (Perron ,1883 ; IAP, 1972). Ces dépôts se montrent à des altitudes très variées, et il paraît en avoir été formé à de nombreuses époques successives, ou plutôt ils se sont formés à peu près sans discontinuité, et leur formation continue même de nos jours (Soleilhavoup, 2011).

Échelle des longueurs : 1 : 800.000 ; des hauteurs : 1 : 200.000.



Légende.

<i>m</i> Miocène inf ^{er} .	<i>cs</i> Crétacé supérieur.	<i>ca</i> Albien.
<i>o</i> Oligocène.	<i>cm</i> Crétacé moyen. — <i>t</i> Turonien.	<i>j</i> Jurassique.
<i>ei</i> Eocène inférieur.	<i>ci</i> Crétacé inférieur.	<i>l</i> Lias.

Figure 7. Profils géologiques dans l'Atlas Saharien région de Laghouat (D'après Ritter, 1902 in IAP 1972).

3. Cadre géomorphologique de la wilaya de Laghouat

Les paysages de la wilaya de Laghouat présentent une topographie typique des régions sèches, l'expression synthétique de l'interaction entre les facteurs climatiques et géologiques la caractérise par les reliefs plus ou moins abrupts, surtout de l'Atlas Saharien qui s'opposent aux vastes surfaces subhorizontales dont les valeurs morphologiques ne sont pas les mêmes (Augustin, 1898 ; Augustin et Ficheur, 1998 ; Ritter, 1902 ; Pouget, 1980 ; Djebaili, 1984 ; Aidoud, 1984). Le paysage dans les steppes sud Algéroises a été façonné par la succession de plusieurs séquences d'érosion dont la plus ancienne correspond à la fin du tertiaire et marque le début du quaternaire (Pouget, 1980). Au delà des méthodes utilisées qui ont décrit les paysages dans la steppe centrale et de son voisinage, les géo formes modelées (Figure 8) peuvent se résumer à :

3.1. Les reliefs

Ce sont l'ensemble des inégalités de la structure terrestre de la wilaya, formés de relief de l'Atlas Saharien et sont principalement dues : à ce que le plissement moins intense a été inachevé, rudimentaire en quelque sorte, et à ce qu'une période sèche ayant succédé à une phase humide, l'érosion par les eaux courantes est devenue intermittente ; les matériaux de cette érosion sont restés sur place, et l'érosion éolienne, a pris le dessus (Augustin et Ficheur, 1902). Aussi il convient de distinguer dans les reliefs montagneux de l'Atlas Saharien, deux aspects bien caractérisés par leur nature lithologique : les reliefs gréseux et les reliefs calcaires (Pouget, 1980). Les intervalles des altitudes permettent de distinguer à Laghouat trois formes de reliefs.

3.1.1. Les Djebels et montagnes : constitués par les monts du Djebel Amour dont les altitudes varient entre 800 et 1720 m. Cette zone est formée d'une succession de montagnes qui occupent une bande de 150 km de large du Nord au Sud, et de 400 km du Sud Ouest au Nord Est, et paraissent dominer dans la plupart des chaînons (Ritter, 1902).

3.1.2. Les piémonts : allongée d'Ouest en Est, présente une largeur réduite et elle correspond aux piémonts bas de l'Atlas Saharien et aux vallées des oueds Djedi, oued Atar et Oued M'zi.

3.1.3. Les surfaces subhorizontales : appelée communément "Zone de Dayas" formée pratiquement d'un plateau plus ou moins ondulé dans les régions de El Houita, Hassi Delaa et Hassi R'mel.

3.2. Les Hautes surfaces (Glacis et Terrasses)

Façonnées par les mouvements tectoniques et les variations climatiques du Quaternaire. L'Atlas saharien se retrouve soulevé en position dorsale par rapport au compartiment saharien resté stable et aux hautes plaines coincées entre les deux Atlas. Par référence à la terminologie établie au Maroc il est d'usage de les appeler « Hautes surfaces Moulouyennes ». Elles se présentent sous forme de surface d'érosion en pente douce, développées dans les régions semi-arides au pied des reliefs. Elles forment l'ensemble des glacis, des terrasses, des chenaux d'oueds alluvionnés et des zones d'épandages et de débordements. Décrites par (Estorges, 1965 et Pouget, 1980), il est à distinguer les principales formations suivantes.

3.2.1. Les formations encroûtées du quaternaire ancien

Se présentent sous forme de surfaces soulevées dans son ensemble, mais soumise à une érosion intense qui va l'attaquer vigoureusement et la déblayer complètement en maints endroits. Soit plissée ou disloquée dans les zones marginales. Soit maintenue en place formant les hautes plaines et les piedmonts sahariens. Le Glacis du Quaternaire ancien (Moulouyen) est très bien conservé dans la région de Taadmit, sa couverture bien alimentée par la côte calcaire turonienne, est épaisse de 3 à 5 m. Un encroûtement de calcaire pulvérulent surmonté d'une dalle de croûte, consolide une masse de galets. Au Sud de la ville de Laghouat, le Glacis du Quaternaire ancien est un plan incliné simple qui depuis une ligne de hauteurs (Ras Boutrekfine) s'infléchit régulièrement vers le Nord (Oued M'Zi), il est également représenté par une croûte calcaire épaisse et par des galets (Estorges, 1965).

3.2.2. Les formations plus ou moins encroûtées du quaternaire moyen

Avec la surrection de l'Atlas Saharien, l'enfoncement du réseau hydrographique provoque une reprise intense de l'érosion et une incision très active de la haute surface Moulouyenne. De plus, parallèlement aux mouvements tectoniques les conditions climatiques pluvieuses accentuent encore les phénomènes érosifs et le rajeunissement des formes du relief. On

distingue deux niveaux de glacis, ou de glacis-versants et de terrasses rattachables au Quaternaire moyen.

Le premier glacis est mieux représenté dans le bassin de l'Oued Taadmit, il est nettement individualisé sous forme d'une longue lanière dont la croûte sommitale enrobe une nappe de galets. Au pied des dernières crêtes turoniennes existent encore de courts glacis de piémont, mais en aval et au Sud de l'Oued M'Zi, la forme de glacis-versant domine ;

Le deuxième glacis (Tensiftien) est largement fossilisé par une croûte calcaire qui surmonte une nappe de galets hétérométriques. Des glacis de piémont s'esquissent à proximité de Laghouat, de part et d'autre de l'Oued M'Zi. Partout ailleurs règne le glacis-versant. Plus en aval, la terrasse correspondant à ce niveau est en moyenne à 5 m au-dessus des écoulements actuels et tend à se confondre avec la nappe alluviale du Quaternaire récent et à disparaître même à certains endroits sous ce remblaiement.

3.2.3. Les formations du quaternaire récent et actuel

Elles ont été décrites à El Haouita au sud Ouest de la wilaya de Laghouat par (Estorges *et al.*, 1969). Terrasses de basses topographies localisées de part et d'autre des écoulements, en contrebas du glacis Tensiftien, elles comprennent deux à trois niveaux différents. On rencontre d'abord un glacis-versant, ou un glacis sur piémont, étagé dans le précédent. On passe ensuite aux basses terrasses qui peuvent être exceptionnellement raccordées en continuité au glacis, mais ordinairement viennent s'y emboîter.

3.3. Les dépressions (Dayas)

Ce sont des dépressions de type fermé aux bords faiblement inclinés, de formes grossièrement circulaires, parfois elliptiques mais toujours globuleuses et arrondies de diamètre très variables pouvant dépasser quelques centaines de mètres (Tricart, 1969). La plus part se localisent sur les surfaces encroutées du quaternaires ancien moins souvent sur le quaternaire moyen, d'autres existent dans certaines formations du jurassique et du Crétacé (Capot et Rey, 1939). Le caractère spécifique des dayas est d'avoir un fond très plat, de n'être qu'accidentellement limitées par des abrupts, et jamais complètement imperméables. Elles sont présentes sous climat aride ou semi-aride, elles sont abondantes de part et d'autre de l'Atlas saharien mais nulle part en semis homogène, peuplées de « *Pistacia atlantica* » au sud

de Laghouat. Dans cette région elles couvrent environ 2 % de la surface des terrains de parcours. Leur densité est d'une unité par kilomètre carré, leur diamètre de 100 à 300 mètres, leur profondeur de 2 à 4 mètres en moyenne (Monjauze ; 1968 ; 1982). Dans le sud Ouest de la wilaya, il existe de grandes Dayas à falaises (Goussa, Nebch Ed Dhib), se sont inscrites dans l'ancien chenal abandonné de l'Oued Mehaïguène. Leur taille jusqu'à plusieurs kilomètres de diamètres, leurs formes contournées et leur profondeur, résultant également de la coalescence de plusieurs Dayas (Chettih, 2007).

3.4. Les formations éoliennes

Les processus géomorphologiques éoliens sont largement dominants au-dessous de 100 mm avec, pour corollaire l'existence de divers types de regs et de dunes (Le Houérou, 1993). Résultent notamment pour une bonne partie du démantèlement des grès albiens des reliefs. A Laghouat ces formations se présentent sous formes de buttes sableuses désordonnées appelées localement *Nebka* à proximité des grands Oueds : M'Zi, Maleh-Mehaïguène et Djedi. La wilaya de Laghouat est caractérisée également, par la présence de petites dunes vives et isolées sur les flancs des reliefs. Les formations éoliennes à Laghouat peuvent être non fixées ou fixées par des psammophytes vivaces ou annuelles (Augustin, 1898 ; Augustin et Ficheur, 1902 ; Chettih, 2007). Les formations éoliennes dans l'Atlas Saharien (Figure 4) sont d'âges, de taille et de nature différente elles ont été décrites par (Monod, 1973 et Pouget, 1980).

3.4.1. Les formations éoliennes anciennes et fixées

Formées par déplacement par le vent de sables qui remontent les flancs des djebels, franchissent les crêtes et se trouvent ainsi piégés de l'autre coté du versant. Les sables transportés par saltation s'accumulent peu à peu, il se forme un placage dont la masse devient importante. Leur granulométrie se caractérisent par des sables fins très bien triés dont la grosseur est située entre 110 μm et 120 μm et de couleur généralement jaune-rougeâtre.

3.4.2. Les formations éoliennes mobiles non ou peu fixées

Formations sableuse d'importance et de formes très variées et variables (Figure 9). Selon la nature de l'obstacle les sables s'accumulent pour donner naissance à différentes formations qui ont été décrites par Pouget (1980).

3.4.3. 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.

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.

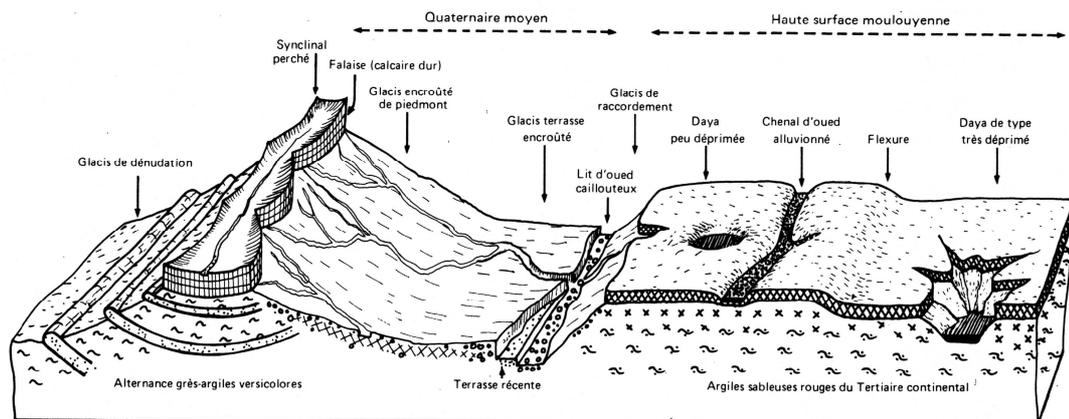


Figure 8. Schéma théorique montrant quelques unités géomorphologiques dans les steppes sud Algéroises, (Source : Pouget, 1980).

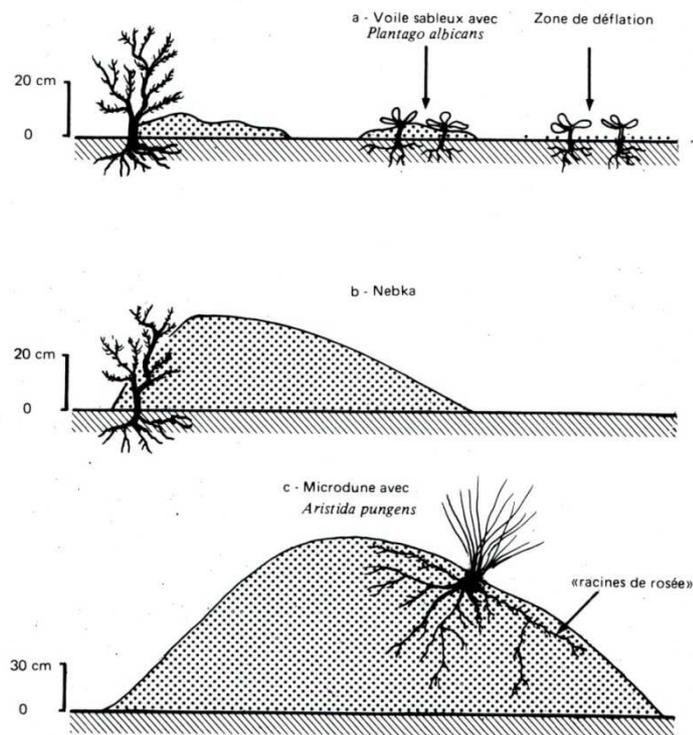


Figure 9. Principales formations éoliennes mobiles (Source : Pouget, 1980).

4. Cadre pédologique de la wilaya de Laghouat

Il est assez difficile de présenter de façon claire les domaines pédologiques de la wilaya de Laghouat. Ce ci tient d'abord de l'importance de la taille de sa superficie globale. En outre les données pédologiques qui existent sur la wilaya de Laghouat sont relativement maigres et résultent en grande majorité d'un travail sous forme d'une prospection pédologique réalisée dans la wilaya sur 202 profils par BNEDER (2014), et d'une carte des sols de l'Afrique élaborée en 1963 par l'institut géographique militaire de Bruxelles (Commission de coopération technique en Afrique, 1963), et à travers laquelle (feuille N°5 et feuille N°6) exposent l'ensemble des sols de l'Algérie. La partie de cette carte qui traite les sols de l'Algérie repose essentiellement sur les travaux de (Durand, 1954 ; Boulaine, 1957 et Duthil, 1962), basés sur la classification française des sols ou le facteur climatique joue un rôle essentiel dans la pédogenèse (vent, pluie, température) ensuite sur le degré de évolution du sol (nombre d'horizons différenciés), enfin accessoirement, sur le degré des lessivages (roche mère).

4.1. Types de sols dans la wilaya de Laghouat

Afin de tenter une approche représentative et descriptive de l'ensemble des sols de la wilaya de Laghouat, la carte élaborée en 1963 par l'institut militaire de Bruxelles a été utilisée pour délimiter l'ensemble de ses grands domaines pédologiques. Dans la partie qui couvre la wilaya de Laghouat (Figure 10), la carte montre une mosaïque dans laquelle cinq classes de sols sont dispersées (sols minéraux bruts, sols peu évolués, sols calcimagnésiques, sols isohumiques, et sols des dayas), et dans lesquelles treize types de sols sont identifiés.

4.1.1. Sols minéraux bruts

Les sols minéraux bruts se caractérisent par des profils peu développés et peu différenciés, les matières organiques sont présentes sous formes de traces dans les vingt premiers centimètres ; les matières minérales peuvent avoir subi une dégradation et une fragmentation mécanique plus ou moins poussées, mais l'altération chimique reste faible. Ils sont caractérisés par une texture très sableuse et s'observent sur des roches ou des formations superficielles qui n'ont pas encore subi ou ont peu subi l'évolution pédologique. Dans la wilaya de Laghouat on a identifié trois types.

4.1.1.1. Sols minéraux bruts d'érosion lithiques

Ces Sols sont peu épais 0-5 cm, à texture limono-sableuse, friable, la roche mère calcaire est présente à 5 cm. Ils sont très pauvres en matières organiques (inférieure à 0,2 %). Ils se caractérisent par une forte porosité et la présence de 10% à 15% de cailloux gréseux et la présence de peu de racines (BNEDER, 2014).

4.1.1.2. Sols minéraux bruts d'apport éolien

Il s'agit de dunes ou de microdunes de sables mobiles, très peu fixés par la végétation. La teneur en limons et argiles (éléments fins) est toujours faible inférieure à 5%, la texture sableuse demeure la caractéristique majeure de ces sols (Pouget, 1980). La granulométrie de ces formations semble dépendre de la force du vent qui les a déposés. Les formations des dépôts récents présentent des aspects ondulés peu végétalisés tandis que les dépôts plus anciens se montrent stabilisés par une végétation relativement dense (BNEDER, 2014).

4.1.1.3. Sols minéraux bruts d'apport alluvial

Il s'agit de sols peu épais, ne contenant que des traces de matières organiques dans les 20 premiers centimètres ou bien moins de 2 % dans les trois premiers centimètres de surface. Le matériel minéral subit une fragmentation mécanique plus ou moins poussée alors qu'il n'y a pas d'altération chimique. Ils ont diverses roches mères calcaires, gypseuses, salées. Formés sur des surfaces relativement récentes, Quaternaire moyen ou récent occupant des places assez importantes : glacis de piedmont, glacis de raccordement, terrasses anciennes du Tertiaires et certaines zones d'épandages (BNEDER, 2014).

4.1.1.4. Sols minéraux bruts d'apport colluvial

Ils occupent des superficies étendues sur les glacis, ils présentent les caractéristiques des sols précédemment décrits, mais avec une différence importante : leurs très faibles teneurs en matières organiques inférieures à 0,2 % le long du profil et une forte charge caillouteuse 30 à 40 %. Leur texture est sableuse sur les dix premiers centimètres et est limono sableuse en dessous. Le profil est d'épaisseur faible, la roche mère calcaire émerge à partir de 17 cm. Racines peu nombreuses et parfois absentes, faible activité biologique, matières organiques parfois non décelables, une très forte porosité les caractérise aussi (BNEDER, 2014).

4.1.2. Sols peu évolués

Les sols peu évolués sont des sols jeunes qui se distinguent par une faible altération des minéraux et une faible teneur en matières organiques. Ces sols ont des origines liées à l'érosion ou aux apports extérieurs. Ils sont non ou peu organisés en horizons, à profil peu différencié, soit parce qu'il y a réception de matériaux frais, soit rajeunissement permanent par suite d'une intense action de l'érosion (Duchaufour, 2001), ils sont très perméables et sensibles à l'érosion. Dans la wilaya de Laghouat trois types se différencient.

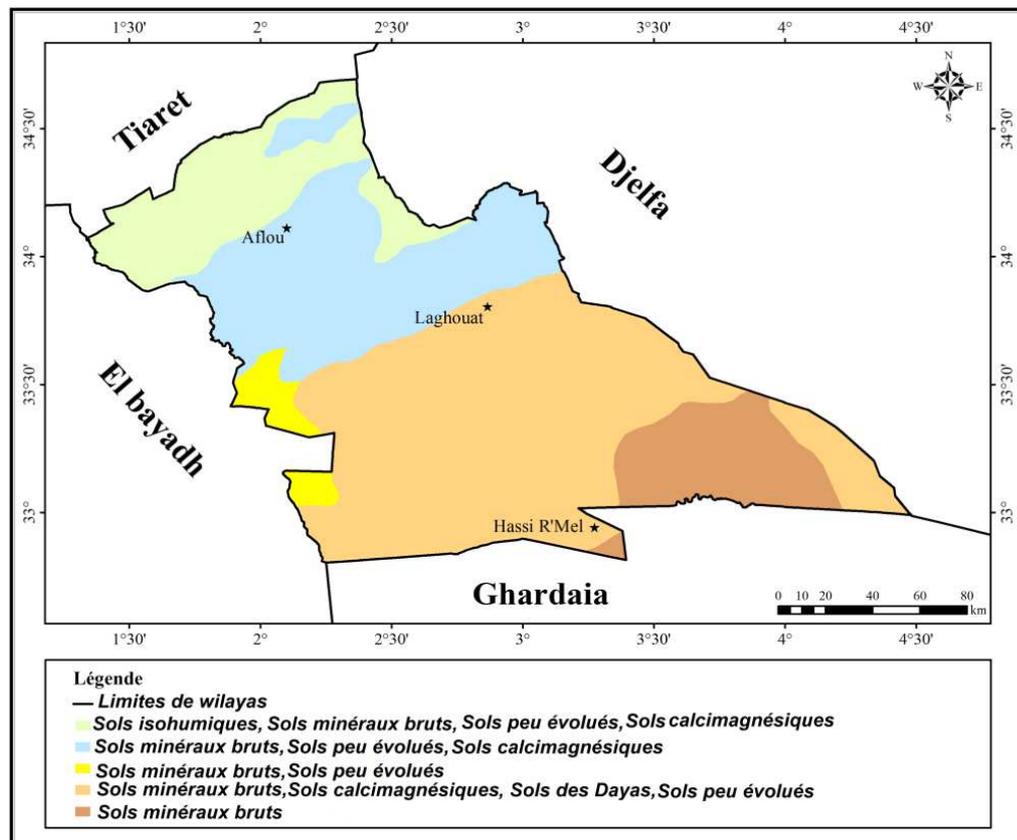


Figure 10. Carte des sols de la wilaya de Laghouat (Dérivée de CCTA ; 1963).

4.1.2.1. Sols peu évolués d'apport éolien

Ils se caractérisent par une végétation plus ou moins dense qui a permis une certaine évolution du sol. Le sol est peu épais, il présente une structure lamellaire résultant de dépôts de matériaux récents. La coloration de l'horizon de surface indique la présence de matières organiques. La texture est grossière sans charge caillouteuse, les sables représentent plus de 90% pour un taux de calcaire toujours faible inférieur à 2% et un pH élevé (Pouget, 1980 ; BNEDER, 2014).

4.1.2.2. Sols peu évolués d'apport alluvial

Les sols alluviaux sont des dépôts récents apportés par les cours d'eau intermittents à la faveur des crues. Ils occupent les terrasses, les zones d'épandage, les chenaux d'oueds alluvionnés. Ils sont peu épais formés sur pente, à matières organiques parfois évoluées. Leur

texture est anisotrope (alternance sans ordre, ni de granulométrie, ni de nature de divers matériaux, argiles limons graviers). Ces sols sont généralement cultivés (céréales). Le taux de calcaire dans ces sols reste assez élevé (20% à 40%) et la salure devient importante en profondeur (Pouget, 1980 ; Monjauze, 1982 ; BNEDER, 2014).

4.1.2.3. Sols peu évolués d'apport colluvial

Très répandu dans le centre et le sud de la wilaya, ils se localisent en bas de pentes et dans de larges zones dépressionnaires, encaissées formées entre les reliefs. Ces sols présentent une granulométrie moyenne à fine et sont parfois couverts de fines couches d'éléments minéraux. Leur profondeur est fonction de la pente et de leur position dans le paysage, ces sols sont pauvres en matières organiques inférieure à 0,5%, ce qui les rend très sensible à l'érosion notamment éolienne (BNEDER, 2014).

4.1.2.4. Sols peu évolués d'érosion lithique

Sols jeunes ou rajeunis, sur roches imperméables aux racines mais dont le pédoclimat permet l'évolution. Le sol est peu épais à profil A C, pauvres en matière organique, appelés aussi sols régosoliques (Aubert, 1960). Dans la région de Laghouat ces sols comportent une importante charge caillouteuse calcaire, leur texture est limoneuse à limono-sableuse, très pauvres en matières organiques (inférieure à 0,3 %), ils ne sont pas salins (BNEDER, 2014).

4.1.3. Sols calcimagnésiques

La présence d'ions alcalino-terreux dans les horizons supérieurs est le principal caractère de ces sols. L'approvisionnement du sol en Ca^{2+} est assuré par la roche mère calcaire ou bien des apports latéraux. Le calcaire provoque un blocage précoce de l'humification avec la formation de mull carbonaté. L'excès de calcaire actif rend ces sols très difficiles à être exploités en agriculture. Ils sont très collants aussitôt arrosés et très secs en période estivale. Si la matière organique est rapidement décomposée, l'humus est tout à fait indisponible (Durand, 1954 ; Boulaine, 1957,1961 ; Duthil, 1962 ; Duchaufour, 2001). Le blocage du fer et du phosphore par le calcaire interdit la pratique de nombreuses cultures. Le pH de ces sols est souvent alcalin, ce qui limite aussi certaines cultures et aussi le développement de certains microorganismes. La présence du calcaire est une caractéristique des sols d'Algérie. Au nord du pays jusqu'aux limites sud des zones steppiques, le calcaire est présent selon la latitude

avec une tendance négative du Sud vers le Nord et sa distribution verticale ou spatiale est fonction des pluies, les régions relativement sèches accumulent plus de calcaire dans les horizons de leurs sols (Djili *et al.*, 1999). Dans la wilaya de Laghouat trois types de sols calcimagnésiques ont été identifiés.

4.1.2.1. Sols bruns calcaires

Se rencontrent dans les djebels gréseux de l'Atlas saharien dans un climat aride supérieure sous matorral (BNEDER, 2014). Ces sols se caractérisent essentiellement par la présence de calcaire dans un horizon humifère d'épaisseur variable de 10 à 30 cm, à texture grossière ou moyenne avec la présence de nombreuses racines. Il repose sur du gré plus ou moins diaclasé intercalé par de locales accumulations calcaires (croûte ou encroûtement). Ces sols se distinguent aussi par la présence de minces strates décimétriques de marnes intercalées entre les bancs gréseux expliquant pour une part une décarbonatation incomplète et l'accumulation du calcaire est autant plus nette que le profil se situe en bas de versant. Les sols bruns calcaires se montrent relativement fertiles s'ils sont arrosés (Durand, 1954 ; Pouget, 1980).

4.1.2.2. Sols à croûtes calcaire

Les sols à croûtes calcaires appartiennent aussi à la classe des sols calcimagnésiques. Dans les steppes sud algéroises au Nord Est de Laghouat (Pouget, 1980) les a décrit sur les surfaces du Quaternaire ancien et Quaternaire moyen sur du matériau très diversifié : alluvions, colluvions de piedmont, calcaire lacustre, et argile sableuse. En règle générale les croûtes sont d'autant plus épaisses et consolidées qu'elles se trouvent en surfaces plus anciennes et plus arides, la nature du matériau et la situation topographique contribuent fortement à une grande diversité morphologique (Boulaine, 1961 ; Pouget, 1980). Ils peuvent être présents sous végétation forestière ou clairsemée.

4.1.2.3. Rendzines

Présentent dans l'Atlas Saharien, il s'agit de rendzines humifères typique sous végétation matorral. De texture moyenne à fine, avec une structure grumeleuse. La teneur en calcaire est généralement inférieure à 10 % .Pair ailleurs la présence du calcaire en plaquettes favorise leur formations (Aubert, 1960 ; Pouget, 1980 ; BNEDER, 2014).

4.1.4. Sols isohumiques

4.1.4.1. Sols bruns et châtaîns méditerranéens

La plus part de ces sols sont formés sur les marnes et calcaires durs, en lits alternés marne calcaire dure, les lits marneux sont importants par rapport aux lits de calcaires durs. L'abondance des résidus non carbonates favorise la formation d'un sol brun, argileux, calcaire, plus ou moins profond. Du fait de l'imperméabilité du milieu, les solifluxions sont fréquentes et la lixiviation des carbonates ralentie. Ils ont été décrits sur des pentes pouvant être assez élevées (jusqu'à 40 %), ils sont non poreux et cohérents sous matorral dégradée ou végétation graminée. Le taux du calcaire est variables avec une tendance positive vers la base du profil, il peut s'accumuler en profondeur sous forme de petits amas friables, de nodules, d'encroûtements et de croûtes (Lamouroux, 1968 ; BNEDER, 2014).

4.1.5. Sols des dayas

Les dépressions non salées de types dayas offrent des sols diversifiés, généralement profonds et plus ou moins évolués. Le sol est alluvionnaire et bien tassé, l'action de l'Homme et de la végétation façonne son évolution (Capot Rey, 1939, Estorges, 1961 ; Monjauze, 1982). Au nord Est à environ 40 km de Laghouat Pouget (1980) décrit trois ensembles de sols des dayas qui s'individualisent en fonctions de leurs degrés d'évolution, ayant en commun : une texture moyenne à fine, une faible teneur en calcaire, le sol est parfois complètement décarbonaté. Ils présentent une perméabilité d'ensemble faible ne permettant qu'une lente percolation à travers le profil, favorisant ainsi une stagnation plus ou moins prolongée de l'eau et son évaporation en surface. La structure du sol est instable en surface avec un horizon finement lamellaire de quelques millimètres à quelques centimètres, et présente une croûte de battance. Ce sont des sols favorables aux cultures pluviales, les rencontre au sud et au nord de la wilaya.

5. Climatologie de la wilaya de Laghouat

Le climat de chaque région de la planète se caractérise par un style bien particulier de rapports. Rapports entre la circulation atmosphérique, le milieu géographique dans lequel elle se trouve, et son géo-voisinage qu'il soit proche ou lointain. Les études des dynamiques du climat de l'Afrique du Nord, du Sahara, et notamment de l'Algérie ont été essentiellement

fondées sur l'observation des basses couches de l'atmosphère ou Troposphère (Perret, 1935 ; Capot-Rey, 1946 ; Isnard, 1952 ; Pédelaborde et Delannoy, 1958 ; Rognon, 1976, 1987). La position géographique de l'Algérie la fait soumettre à l'influence de deux principaux flux d'air (Figure 11) :

- *Au Sud les flux des Alizés.*
- *Au Nord les Westerlies ou les flux polaires.*

Différents types de temps en Algérie résultent donc de la position respective de ces deux fronts, (front polaire et front des alizés), et de l'intensité plus ou moins grande du courant de perturbations qui les suit, on peut distinguer alors quatre types de temps en Algérie.

5.1. Type de temps en Algérie

1.5.1. Un régime anticyclonique

Caractérisé par l'éloignement de tout front permanent et l'absence de tout courant de perturbations. L'anticyclone s'étend de l'Atlantique jusqu'à vers l'Est : le temps est au beau fixe, le vent en Algérie est faible au sol, Ouest en altitude ; et au Sahara Est Nord Est au sol, Ouest Sud Ouest en altitude. Ce type de temps peut se produire en toute saison de l'année (de Septembre à Aout).

1.5.2. Un régime cyclonique de front polaire

Le front polaire occupe sur l'Europe une position suffisamment méridionale pour que les perturbations passant sur le golfe de Gênes, sur l'Adriatique ou plus au Sud affectent l'Algérie. On a alors des vents passant de Sud Sud Ouest (front chaud) à Nord Nord Ouest (front froid), de fortes pluies au Nord de l'Atlas Saharien, des vents de sables au Sud de l'Atlas saharien. Ce type de temps est très fréquent en Automne, en Hiver et au Printemps (de Septembre à Juin).

Il arrive que des dépressions polaires, après avoir cheminé Nord-Sud ou Nord Ouest-Sud Est jusque sur la Méditerranée occidentale, arrivées là prennent la direction Ouest-Est en regagnant une force nouvelle. Ce changement de direction se produit au contact du front des alizés, même si celui-ci ne comporte pas de perturbations propres ; tout se passe comme si l'air chaud tropical avait le pouvoir de « régénérer » les dépressions polaires à bout de souffle.

En pareil cas, il tombe des pluies torrentielles au Nord de l'Algérie.

1.5.3. Des régimes de front des alizés

Il peut arriver que le front polaire soit rejeté tout à fait au Nord de l'Europe et que seul le front des alizés intéresse l'Afrique du Nord et la Méditerranée occidentale ; une dorsale anticyclonique s'étend des Açores à l'Europe orientale. Trois cas peuvent alors se présenter :

i. le front des alizés n'existe qu'en altitude ; au sol on a un courant de Nord Est à Est ; le temps est brumeux sur le littoral Algérien, avec averses d'instabilité dans l'intérieur ;

ii. le front des alizés arrive au sol, mais n'est pas « actif ». L'Algérie tout entière est balayée par le contre-alizé. On a un temps chaud et sec (de juin à Septembre), froid et légèrement pluvieux (de Décembre à Avril) ;

iii. le front des Alizés arrive au sol et donne naissance à des perturbations. C'est avec ce type de temps qu'on enregistre les plus fortes précipitations sur le Sahara et les Hauts-Plateaux.

Il faut noter que, tandis que les dépressions de front polaire ont leur maximum d'intensité en hiver et leurs trajectoires les plus méridionales également en hiver avec déclinaison australe, les perturbations qui suivent le front des alizés paraissent bien avoir leur maximum de fréquence au printemps et ne pas se produire en été.

1.5.4. Un régime mixte

Les deux fronts coexistent et se rencontrent dans la Méditerranée occidentale ; ils ont chacun leur courant de perturbation et tous les deux interfèrent. Il en résulte tantôt une neutralisation, tantôt un renforcement de perturbations ; dans ce dernier cas, il se produit de fortes tempêtes jusqu'à l'Est de l'Afrique du nord.

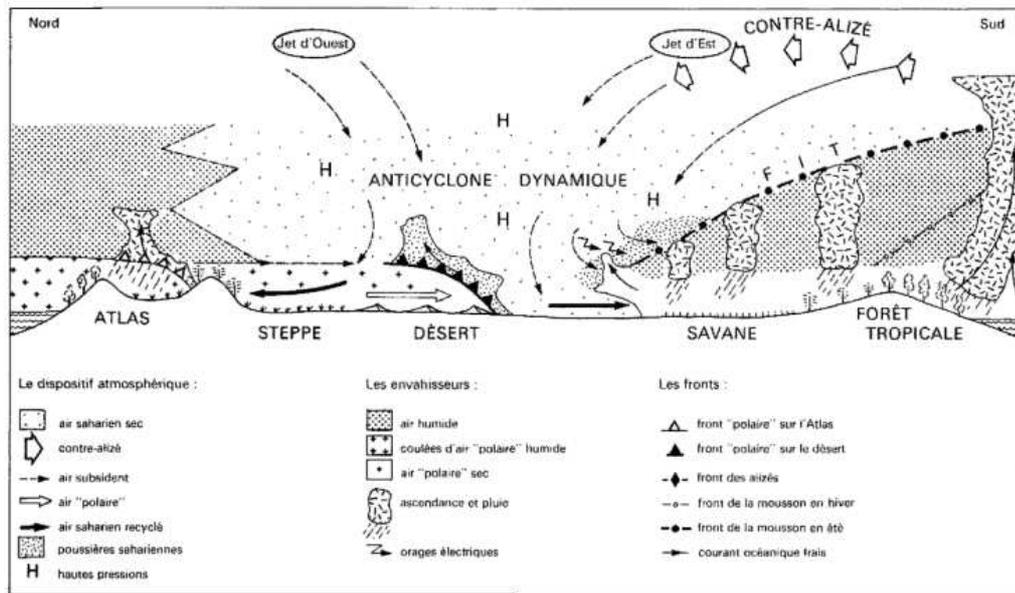


Figure 11. Représentation schématique des flux atmosphériques pour l'Afrique du Nord (source : Rognon, 1995)

5.2. Analyse climatique de la wilaya Laghouat

L'installation d'observatoires climatiques sur le territoire Algérien a permis à partir des années 1930 de préciser la connaissance du climat du pays et du Sahara algérien en effectuant des analyses statistiques de données climatiques recueillies sur plusieurs années de mesures notamment celles effectuées par Seltzer (1946) et par Dubief (1952). De même ces données ont facilité de mieux ranger les climats qui régnaient en Algérie dans la classification mondiale des climats.

La division du globe terrestre en douze zones climatiques par utilisations d'indices Gausson (1957), positionne la wilaya de Laghouat dans deux grandes zones climatiques. Les valeurs des indices affectent la partie nord de la wilaya dans la zone climatique méditerranéenne et la partie sud de la wilaya dans la zone climatique désertique. Le domaine méditerranée est caractérisé par une période hivernale relativement froide et pluvieuse, les précipitations sont plus fréquentes avec une grande variabilité inter annuelle et inter mensuelle. Le domaine désertique est caractérisé par un hiver frais et faiblement pluvieux dans lequel 8 à 12 mois de l'année sont pratiquement secs.

Pour tenter une approche climatique et bioclimatique de la wilaya de Laghouat, nous présentons dans cette étude une synthèse faite sur des données de 17 années (de 1996 à 2012)

de l'Office National de Météorologie (ONM, 2012), relevés dans trois stations de la wilaya de Laghouat :

- ✚ la station d'Aflou au nord de la wilaya de Laghouat ;
- ✚ la station de Laghouat (chef lieu de la wilaya) au centre de la wilaya ;
- ✚ la station de Hassi R'mel au Sud de la wilaya de Laghouat.

5.2.1. Diagramme Ombrothermique de BAGNOULS et GAUSSEN

Le diagramme Ombrothermique de Bagnouls et Gausсен (Bagnouls et Gausсен, 1953) montre (Figure 12), que la durée et l'intensité de la saison sèche est différente d'une station à l'autre, ce qui traduit la variabilité climatique dans la wilaya de Laghouat. Nous notons que, la période sèche dure 4 mois et 2 semaines, de la moitié de mois de Mai jusqu'à la fin Septembre pour la station d'Aflou au nord de la wilaya. D'autre part les données de la station de Laghouat indiquent que la période sèche s'étale sur une période de onze mois, tout les mois de l'année sont en déficit hydrique à l'exception de Janvier. Les données enregistrées dans la station de Hassi R'mel indiquent que tous les douze mois de l'année sont en déficit hydrique. La variabilité des pluies et leur intensité sont très importantes dans l'espace de la wilaya. Les précipitations moyennes annuelles sont de l'ordre de 297 mm à Aflou, la station de Laghouat marquent une moyenne annuelle de 155 mm, la station de Hassi R'mel enregistre la plus faible moyenne annuelle avec 98 mm de pluies. Les courbes thermiques sont positives et les jours longs sont secs (de Mai à Septembre) dans les trois stations représentatives de la wilaya. Les trois stations présentent des indices Xérothermiques (nombre de jours secs) qui valent 230, 350, et 365 respectivement pour Aflou, Laghouat et Hassi R'mel. La station d'Aflou est caractérisée par un climat méditerranéen ou xérothermique, la station de Laghouat se positionne dans un climat subdésertique chaud ou Hémierémique, alors que la station de Hassi R'mel se caractérise par un climat désertique chaud ou Erémique (Bagnouls et Gausсен, 1957). Les températures atteignent leurs valeurs maximales pendant les mois d'été Juillet et Août, elles sont autour de 23°C à Aflou au nord de la wilaya et oscillent autour de 30°C à Laghouat et dépassent les 40°C à Hassi R'mel. Le mois de Janvier est le plus froid pour les trois stations dans lesquelles on note : 2,14 °C, 7,05°C et 9,7 °C respectivement pour Aflou, Laghouat et Hassi R'mel.

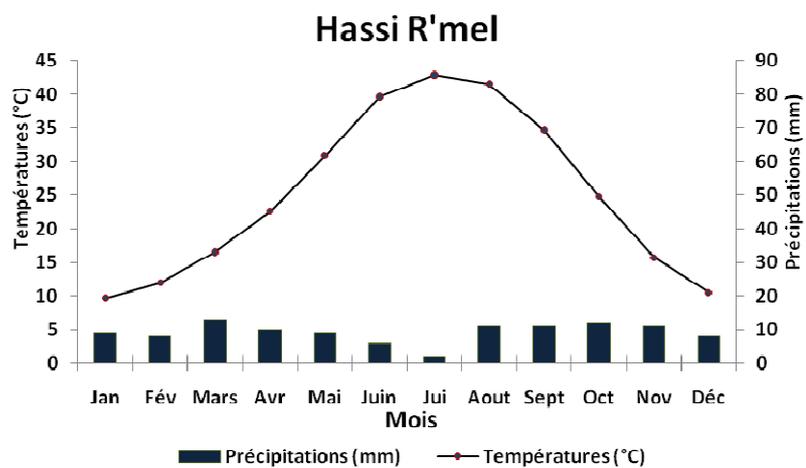
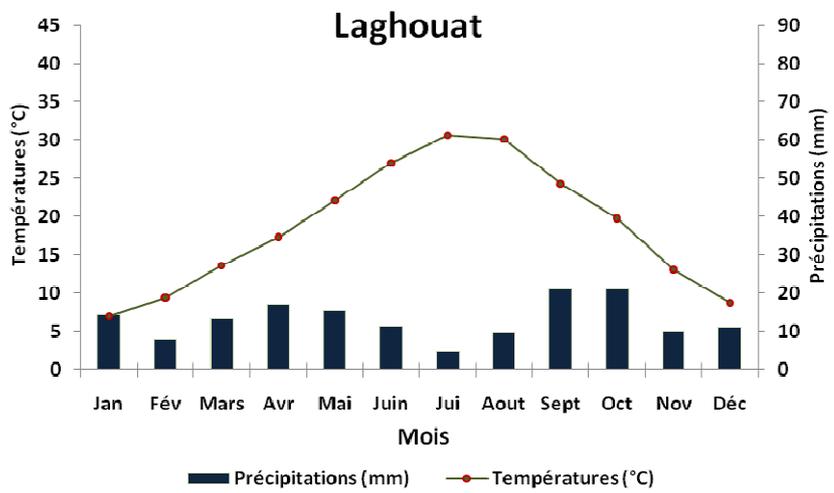
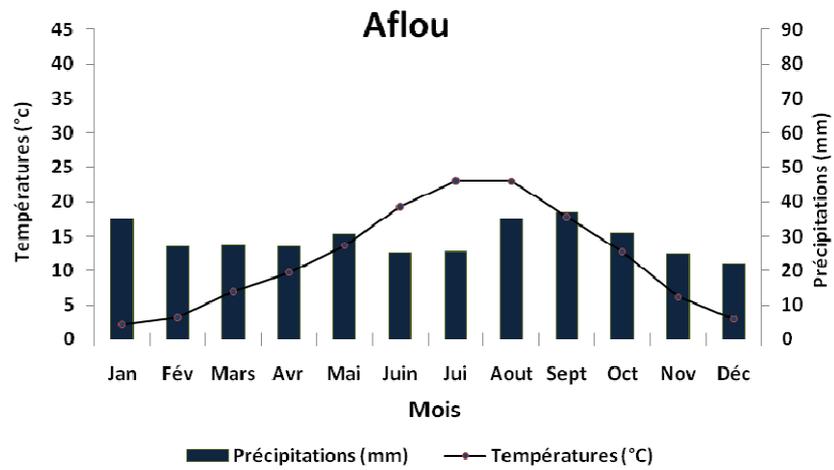
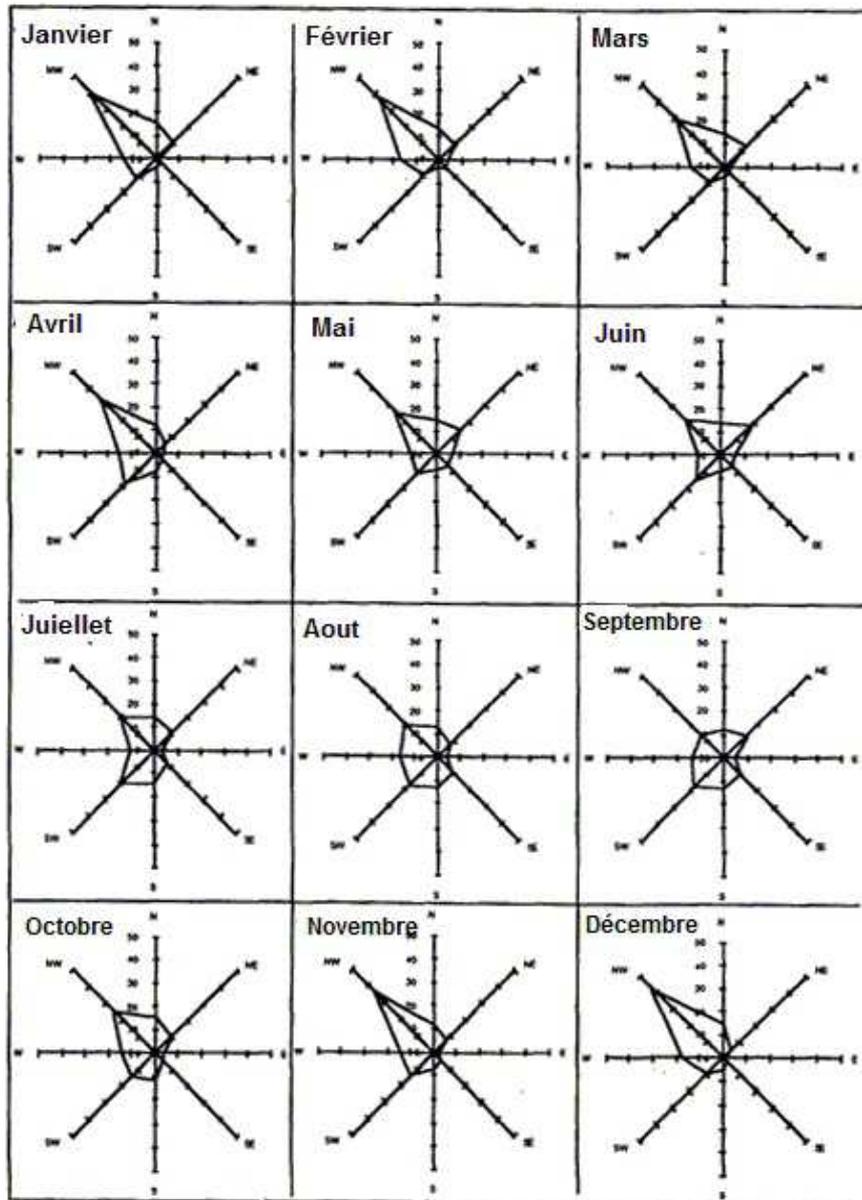


Figure 12. Diagramme Ombrothermique de BAGNOULS et GAUSSEN de trois stations climatiques de la wilaya de Laghouat

5.2.2. Le vent à Laghouat

Par son action dans les déplacements des sables, le vent est l'un des aspects les plus importants dans l'étude climatique de la wilaya de Laghouat. Dans la région de Laghouat les vents d'Ouest ont une action prépondérante, qui est loin d'être négligeable, les flux des alizés présentent quant à eux des activités très localisées (Dubief, 1952). L'analyse des vents effectuée par Seltzer (1946) montre (Figure 13) que durant les saisons Automne, Hiver, et Printemps les vents dominants à Laghouat sont de secteur Ouest à Nord- Ouest ce qui favorise le déplacement des nuages qui viennent du Nord, mais en période estivale ce sont les vents chauds et desséchants d'Est et Sud qui s'affirment le plus. En été Seltzer (1946) note 59 jours de Sirocco à Laghouat un vent chaud et sec d'origine Saharienne. Les fréquences des directions au sol subissent des variations saisonnières relativement nettes : de la fin de l'automne jusqu'au début du printemps (Novembre à Avril), la direction dominante est du Nord-Ouest, avec 29 % en Mars et jusque 42 % en Décembre. A la fin du printemps et en été (de Mai à Octobre), les fréquences sont plus omnidirectionnelles, la part du Nord-Ouest diminue au profit du Nord-Est et du Sud-Ouest, la part des fréquences issues du Sud est de l'ordre de 10 % (Figure 13).



Source: Zelter 1946

Figure 13. Direction moyenne des vents au sol à Laghouat pour chaque mois de l'année, (Source : Seltzer, 1946)

6. La flore de la wilaya de Laghouat

Les domaines bioclimatiques et édaphiques confèrent à la wilaya de Laghouat trois types de végétation. La zone semi aride supérieure et moyenne à 300 mm de pluie est caractérisée par une végétation forestière et matorral présente surtout sur les reliefs de l'Atlas Saharien. La végétation de type steppique est rencontrée sur les formations du Quaternaire dans les zones semi arides et arides. La limite inférieure de la zone aride correspondait à un brusque accroissement du taux des espèces saharo-arabiques dans la composition de la flore ; le taux des espèces sahariennes passe soudainement de 20 à 40 %, inversement le taux des espèces méditerranéo-steppiques diminue de 76 à 59 % par rapport à la partie méridionale de la zone aride. La limite sud de 100 mm correspond à l'apparition d'un couvert végétal diffus sur les regs et les glacis d'érosion ou les sols sont squelettiques. Sur substrat sableux, la végétation peut conserver le mode diffus jusqu'à sous 50 mm de pluviosité moyenne annuelle ou même moins (Quezel, 2002 ; Ozenda, 1983 ; Djebaili, 1984 ; Le Houérou, 1995 ; Amghar et Kadi Hanifi, 2004 ; Salmekour *et al.*, 2013).

6.1. Végétation forestière et matorral

Les espèces liées aux forêts et aux matorrals de la wilaya sont celles du Quercion illicis (Quezel, 2002 ; Ozenda, 1983, 2004) et se résument à : *Quercus ilex*, *Pinus halepensis*, *Juniperus oxycedrus*, *Rosmarinus tournefortii*, *Cistus villosus*, *Dactylis glomerata*, *Thymus ciliatus*, *Helianthemum rubellum*, *Sedum sediform*, *Globularia alypum*, *Avena sterilis*, *Ferula communis*, *Brachypodium distachyum*, et *Quercus rotundifolia*. Les dépressions alluvionnaires ou Dayas supportent *Pistacia atlantica* et *Ziziphus lotus*.

6.2. Végétation steppique

Elle est constituée de groupements herbacés. Du point de vue recouvrement, des études de terrain ont montré que le taux dans la wilaya de Laghouat varie en fonction des saisons, il peut être compris entre 33 et 55 % dans les mises en défens et est entre 13 et 22 % dans les parcours libres. La flore steppique inventoriée sur les parcours de la wilaya de Laghouat a permis de définir une richesse floristique composée de 21 familles et 66 espèces. La famille des Astéracées domine le plus dans la région avec 14 espèces identifiées (*Artemisia herba alba*, *Asteriscus pygmaeus*, *Atractylis flava*, *Atractylis serratuloides*, *Atractylis humilis*, *Atractylis prolifera*, *Atractylis phaeolipis*, *Calendula aegyptiaca*, *Carduncellus*

pinnatus, Centaurea incana, Echinops spinosus, Evax pygmaea, Ifloga spicata, Koelpinia liniaris, Launaea resedifolia, Launaea acanthoclada, Micropus bombicinus, Onopordon sp, Reichardia tingitana, Scorzonera undulate, Xeranthemum inapertum). Les familles des Poacées et des Fabacées sont aussi bien présentes sur les parcours de la wilaya avec un groupe de 7 à 8 espèces chacune. Chez les Poacées les espèces inventoriées se résument à (*Bromus rubens, Dactylis glomerata, Hordeum murinum, Lygeum spartum, Schismus barbatus, Stipa parviflora, Stipa tenacissima*), et parmi les Fabacées inventoriées à Laghouat (*Medicago lactiniata, Astragalus armatus, Astragalus cruciatus, Argyrolobium uniflorum, Hippocrepis multisilicosa, Ebenus pinnata*) (Amghar et Kadi Hanifi, 2004 ; Salmekour *et al.*, 2013).

6.3. Végétation saharienne et sub-saharienne

Les espèces sahariennes ou sub-sahariennes qui dominent dans la région de Laghouat sont celles qui adaptées à la sécheresse ainsi qu'aux températures élevées on y rencontre notamment : *Calligonum spp., Genista saharae, Cornulaca spp., Moltkiopsis spp., Salsola spp., Hammada spp., Anabasis spp., Arfemisia spp., Stipagrostis pungens, Retama raetam, Ziziphus lotus, Acacia raddiana, Pistacia atlantica* (Le Houérou, 1995).

7. Cadre démographique et l'agriculture dans la wilaya de Laghouat

7.1. Population de la wilaya

Le sud de l'Algérie est un territoire relativement peu peuplé, la wilaya de Laghouat présente une densité de la population de 2,4 habitant/km² (DSPL, 2012), une population qui a triplé en un quart de siècle (Figure 14), et on peut penser que cet accroissement se poursuit jusqu'à actuellement. Cette dynamique d'accroissement de la population est similaire à celle dans d'autres wilayas du Sahara (Cote, 2002 ; Dubost, 2002).

La répartition des habitants sur le territoire de la wilaya est inégale, les chiffres de 2012 indiquent que la ville chef lieu de la wilaya compte environ 32% du totale de la population, la ville d'Aflou est suivante avec 22% du totale des habitants. Le reste des vingt deux communes se partagent l'autre fraction (46 %) de la population avec des taux fluctuants entre un minimum de 0,7% et un maximum de 5% respectivement pour les communes d'Oued M'zi et Tadjmout, localisées au centre de la wilaya. Hassi R'mel au sud compte environ 4% de la population totale de la wilaya.

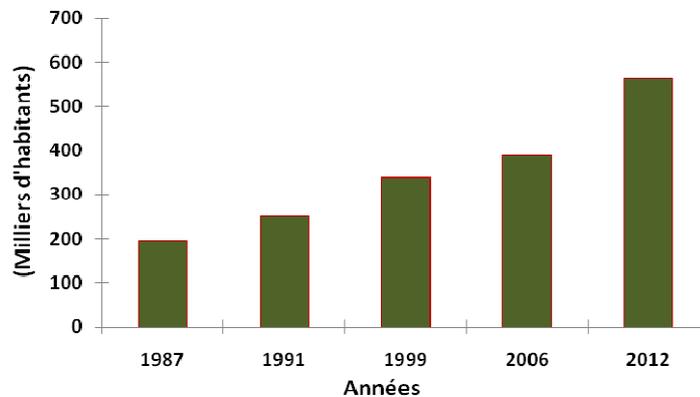
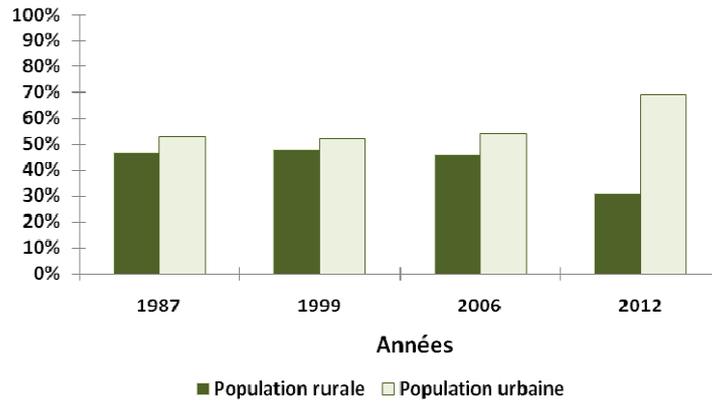


Figure 14. Evolution de la population de la wilaya de Laghouat (1987-2012), (Source : DPSL ; 1987 à 2012)

7.2. Evolution de la population rurale dans la wilaya de Laghouat

La wilaya de Laghouat compte vingt quatre communes urbaines. Si on considère que la population rurale est celle dont l'activité principale est l'agriculture (Bédrani, 1991), qui habite en dehors des communes urbaines, dans des lieux épars sur le territoire de la wilaya, ou bien pouvant être des populations nomades qui pratiquent la transhumance. La (Figure 15) montre que la population rurale dans la wilaya a suivi une dynamique pratiquement constante entre les années 1987 et 2006. A partir de l'année 2006, la population rurale a reculé d'environ presque 1/3. Ce recul est en faveur d'une population urbaine constituée en 2012 de 54% du total de la wilaya. L'évolution de la population urbaine peut être expliquée par une urbanisation ou une extension du bâtiment que connaît le chef lieu (ville de Laghouat) au dépend de la régression d'espaces végétalisés, un environnement mutant que connaît cette ville signalé par (Benblidia *et al.*, 2013 ; Abdellaoui *et al.*, 2009 ; Benkouider *et al.*, 2013). Un tel mouvement d'urbanisation que connaît également le Sahara Algérien au dépend de palmeraies et de la régression d'Oasis signalé par (Dubost, 1986 et Cote, 2002).



**Figure 15. Evolution de la population rurale dans la wilaya (1987-2012),
(Source : DPSL ; 1987 à 2012)**

7.3. Le secteur de l'agriculture dans la wilaya de Laghouat

Pendant ces dernières quinze années l'activité agricole dans la wilaya de Laghouat a suivi une dynamique de déclin (Figure 16). La position de Laghouat dans la steppe la caractérise par une vocation pastorale, les zones des parcours occupent 89% du total de la superficie de la wilaya, l'élevage ovin constitue une part importante des revenus de la population de la wilaya (DPSL, 2012). Entre les années 1980 et 1990 les activités agricoles et pastorales donnaient du travail à 37 % des actifs dans la steppe (Abaab *et al.*, 1995). La diminution du nombre de la population active dans le domaine de l'agriculture observée à Laghouat à la fin des années 1990 peut s'expliquer par la régression de la couverture végétale de ses parcours steppiques. En effet cela a aussi provoqué à partir des années soixante le changement du mode de vie d'une population de nomades dont l'activité principale est l'élevage du mouton (Nedjraoui et Bédrani ; 2008). Les parcours steppiques devenus improductifs et hostile à toute forme de pastoralisme ont provoqué un bouleversement chez des bergers ou des éleveurs ruinés, qui abandonnent les parcours steppique dans l'obligation de survivre (Mouafeg, 1984 ; Duvigneau, 1987). Hormis les gros éleveurs la misère de la steppe amène ces populations à chercher d'autres revenus, la majorité des nomades se dirigent vers les villes les plus proches à la recherche d'un emploi (Regazzola, 1969 ; Bédrani, 1993). Les villes offrent les possibilités d'un revenu stable par le biais d'une nomination dans un office, ou une administration ou tout autre secteur. Cette dynamique de l'activité agricole expliquerait aussi le décroissement de la population rurale déjà observé dans la wilaya de Laghouat (Figure 15). La (figure 16) montre également que contrairement la part de la main d'œuvre active dans le bâtiment et les travaux publics évolue de manière positive, l'accroissement est relativement important entre les années 2006 et 2012. L'urbanisation et l'extension du bâti que connaît la

ville de Laghouat ces dernières décennies (Benblidia *et al.*, 2013 ; Abdellaoui, 2009 ; Benkouider *et al.*, 2013) est un bon indicateur de l'augmentation du nombre de personnes qui sont employés dans ce secteur.

D'autre part Hassi R'mel, la cité du gaz et du pétrole dans le sud de la wilaya offre également des mensualités relativement élevées qui permettent une vie meilleure et plus aisée, ce qui explique bien l'accroissement durant ces dernières quinze années du nombre de personnes qui travaillent dans le domaine de l'industrie (Figure 16).

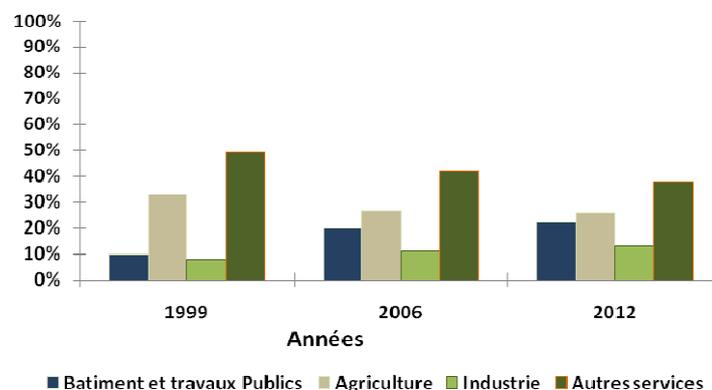


Figure 16. Evolution de la répartition de la main d'œuvre active dans la wilaya de Laghouat par secteur d'emploi (1999-2012), (Source : DPSL, 1999 à 2012)

7.3.1. Occupation des terres dans la wilaya de Laghouat

Les terres utilisées par le secteur agricole occupent un espaces de 2.008.706 (ha), elles sont partagées entre : les pacages et parcours qui constituent le domaine essentiel du pastoralisme et la SAU (surface agricole utile) (DSPL, 2012). La (Figure 17) montre que l'espace de la SAU et celui des forêts suivent depuis 1991 une dynamique relativement constante. Cependant les superficies des parcours et pacages ont évolué de façon croissante entre les années 1991 et 2006, cela semble se faire au dépend d'autres terres, probablement ce sont des terres constituées d'espaces mis en défend pendant des durées de temps limitées et qui ont été ré ouverts pour le pâturage. Entre les années 2006 et 2012 la (Figure 13) montre également que dans la wilaya les superficies des pacages et parcours et celles des autres terres sont restés relativement constantes. Une telle situation est expliquée par l'ouverture au pâturage et la mise en défend simultanées de certains espaces steppiques, suite aux projets de

développement lancés dans le cadre de la lutte contre la désertification dont a bénéficié la wilaya (DGFL, 2012). La SAU à Laghouat n'a pas évolué depuis 1999, les espaces consacrés à la mise en culture dans la wilaya font partie de périmètres agricoles mis en place depuis 1971 dans le cadre des politiques agricoles de l'Algérie (DSAL, 2010). La part la plus importante (63 %) des espaces cultivés dans la wilaya de Laghouat est celle occupée par les périmètres agricoles de l'APFA (Accession à la Propriété Foncière Agricole loi 18-83 qui fut lancé en 1983). Dans le cadre de ce programme 18 périmètres sur une superficie d'environ 45.344 ha ont été attribués à environ 8269 bénéficiaires à travers le territoire de la wilaya (DSPL, 2012).

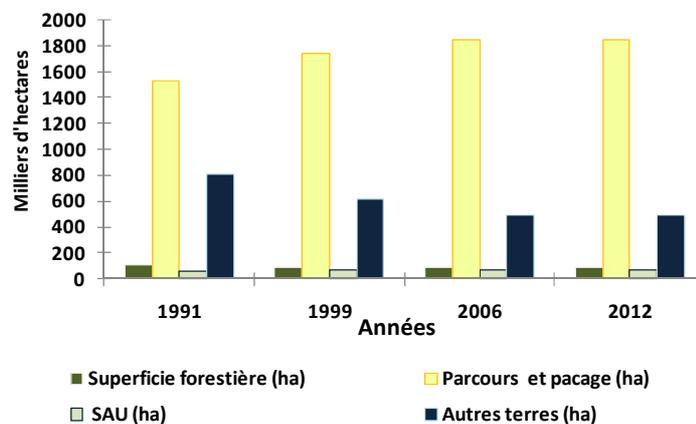


Figure 17. Evolution de la répartition des terres dans la wilaya de Laghouat (1991-2012), (Source : DPSL ; 1991 à 2012)

7.3.2. Evolution du cheptel Ovins dans la wilaya de Laghouat

Le cheptel ovin dans la wilaya de Laghouat a triplé en une vingtaine d'années (Figure.18). Cet état résulte de la demande soutenue et croissante de la viande ovine en relation avec la croissance démographique en Algérie, et la haute rentabilité de l'élevage en zones steppiques du fait de la gratuité des fourrages sur les parcours steppiques. Les subventions que l'état ont accordées à l'aliment concentré pour compenser le maigre apport du fourrage naturel disponible pendant les périodes de disette ont aussi contribué à l'accroissement du nombre de têtes d'ovins enregistré dans la wilaya (Nedjraoui, 2003 ; Nedjraoui et Bédrani, 2008). Cependant l'indice de charge pastorale sur les parcours de la wilaya de Laghouat semble suivre un rythme de croissance il passe de 0,48 têtes par hectare à 1,09 têtes par hectare entre les années 1991 et 2012 (Figures 17 et 18). Boukhobza (1982) estime que cet indice est un

bon indicateur pour juger le degré de dégradation des parcours. Le même auteur révèle qu'il y a un équilibre pastoral si cet indice est inférieur ou égal à 0.25 tête d'ovin par hectare. Cette situation a été signalée depuis 1978 pour l'ensemble de la steppe algérienne où le cheptel est passé d'un équivalent ovin pour 4 ha en 1968 à un équivalent ovin pour 0,78 ha en 1978, provoquant un pâturage excessif des parcours (Nedjraoui, 2003).

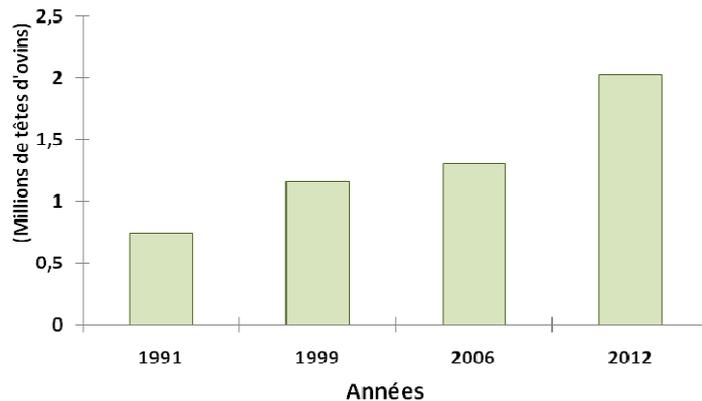


Figure 18. Evolution du cheptel ovin dans la wilaya de Laghouat (1991-2012), (Source : DPSL, 1991 à 2012)

7.3.3. Evolution de la SAU dans la wilaya de Laghouat

A la faveur de la relative disponibilité d'une eau souterraine de bonne qualité chimique dans la wilaya de Laghouat (Hannachi, 1981) et de l'installation de nouveaux équipements d'irrigation dans le cadre du Fond National de la Relance et du Développement Agricole (FNRDA), les superficies des cultures irriguées dans la wilaya ont sensiblement augmenté (Figure.19) de 5.449 ha en 1991 à 32.043 ha en 2012. L'ensemble des terres irriguées dans la wilaya de Laghouat ont été obtenues dans le cadre des politiques agricoles (lois 18-83 et 10-87). La mise en valeur de la terre est extrêmement coûteuse en Algérie (Abdel Hakim, 2009), l'accroissement des superficies irriguées dans la wilaya est bien plus accentué à partir de la fin des années 1990, cet état peut être dû au lancement à partir de l'année 2000 du PNDRA (Programme national de développement et régulation rural). Un programme qui a permis à nombreux agriculteurs du pays le financement de leurs activités et l'octroi d'aides sous multiples formes (petits et gros matériels, semences, engrais, plantations arboricoles...). La (figure 19) montre également que les superficies des terres mises en repos dans la wilaya de Laghouat suivent à partir de 1991 une dynamique décroissante et il semble que cette

diminution est bien en faveur des terres irriguées car les zones des cultures pluviales n'ont pas manifesté entre les années 1991 et 2012 les fluctuations qu'ont subit les espaces des cultures irriguées et ceux réservés aux jachères. La jachère est une pratique très ancienne en zone méditerranéenne (Erroux, 2003), en Algérie elle a été signalé par des colons français dès 1845 (Sagne, 1950). La mise en repos des terres est considérée par les agriculteurs comme un moyen de les laisser au repos au regard de leur faible valeur pédologique d'une part et d'autre part, le coût élevé de leur mise en culture par hectare ne permet pas l'occupation totale de l'exploitation attribuée dans le cadre des politiques agricoles. De plus, le marché qui régit la commercialisation des produits agricoles change d'une année à une autre (Bédrani, 1991). Les superficies des terres cultivées en pluviales sont restées sensiblement stables à partir de l'année 2006.

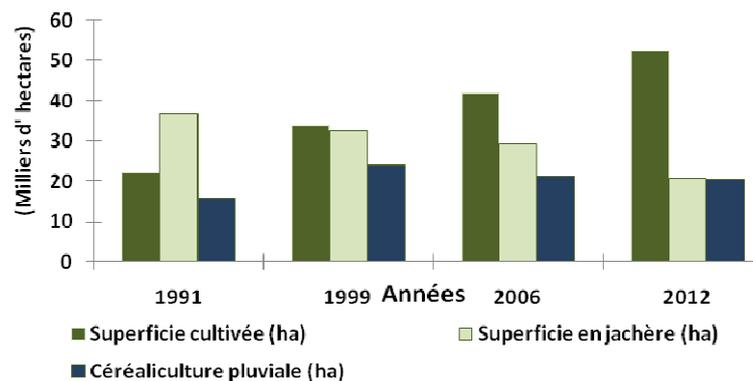


Figure 19. Evolution de la répartition des terres de la SAU dans la wilaya de Laghouat (1991-2012), (Source : DPSL, 1991 à 2012)

7.3.4. Etat des terres dans la wilaya de Laghouat

Les espaces surexploités par les populations de la wilaya sont les parcours steppiques, ils représentent environ 1.842.954 ha (DSA, 2012) parmi les quels 6 % sont en bon état, 26 % sont en cours de reconstitution et la plus grande partie de ces espace soit 68% du total se trouvent dans un état dégradé (Figure 20). Cet état observé dans la wilaya de Laghouat reflète le cas générale dans lequel se trouve l'ensemble des espaces steppiques qui depuis une trentaine d'années, ont été complètement bouleversés, tant dans leur structure que dans leur fonctionnement. Les facteurs de la dégradation sont liés à des pratiques anthropiques

(déforestation, surpâturage, défrichement, labours ...) qui se conjuguent et accentuent le processus de désertification qui aujourd'hui, est décelable par l'œil de l'observateur (Nedjraoui et Bédrani, 2008). Les travaux réalisés et qui représentent un suivi dans le temps et dans l'espace de la régression qualitative et quantitative des steppes montrent l'ampleur de la dégradation du couvert végétal, et l'installation progressive d'une couverture sableuse. Une rupture et un bouleversement non seulement des équilibres écologiques mais également socio-économiques de cet espace (Boukhobza, 1982 ; Le Houérou, 1995 ; 1997, Bédrani, 1995 ; Aidoud et Touffet, 1996 ; Taibi, 1997 ; Khaldoun, 2000, Oussedik *et al.*, 2003, Nedjraoui, 2002 ; Bensaid, 2006 ; Guettouche et Guendouz , 2007 ; Nedjraoui et Bédrani, 2008 ; Slimani et al., 2010 ; Salmekour *et al.*, 2013).

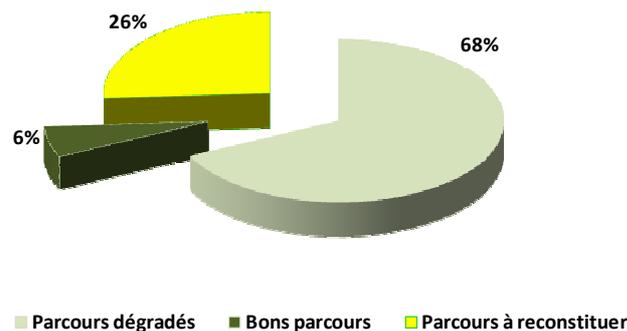


Figure 20. Etat des terres dans la wilaya de Laghouat, (Source : DPSL, 2012)

8. Dégradation des terres dans la wilaya de Laghouat

L'érosion éolienne est la cause majeure de la dégradation des terres dans la wilaya de Laghouat, le phénomène menace 100 % des espaces cultivés ou pâturés (Figure 21). La salinisation touche principalement la plaine agricole irriguée de Kabeg à l'Est de la wilaya dans la commune de Ksar El Hirane, la zone est actuellement siège d'un rabattement de la nappe phréatique et d'une remontée des sels (DSA, 2013). La plaine connaît depuis ces dernières années une désertisation des exploitants pour des destinations inconnues (informations que nous avons DSA 2013). Les sols de la région de Kef El Melh dans le sud ouest de la wilaya dans la commune de Tadjrouna sont aussi menacés de ce même phénomène de dégradation chimique. L'alcanisation est signalée au Nord Est de la wilaya, le phénomène est probablement dû aux excès de calcaires observé par Pouget (1980) dans les steppes sud

algéroises. Au nord Ouest de la wilaya le vent à Laghouat est à l'origine de la genèse de formations sableuse et de l'installation de paysages désertiques (Taibi, 1997). La dégradation des terres dont est siège la wilaya de Laghouat est à l'image de celle dans nombreuses zones semi arides et arides de l'Algérie signalée depuis trois décennies, elle 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 des formations dunaires récentes (Taibi, 1997). Sur certain parcours en raison d'un pâturage excessif, la végétation composée d'alfa, de sparte et d'armoïse, a progressivement régressé jusqu'à l'apparition généralisée de la croûte calcaire du sol (Djebaili, 1984 ; Le Houérou, 1995 ; 1997 ; OSS, 2003 ; Bendarradji *et al.*, 2006 ; Nedjraoui et Bédrani, 2008). L'extension des labours et l'introduction de la mécanisation sont des paramètres de dégradation aussi importants que le surpâturage. Les techniques de labours utilisées par les agropasteurs dans la steppe ont une action érosive, détruisant l'horizon superficiel et stérilisant le sol, le plus souvent de manière irréversible (Nedjraoui, 2003). Les espèces ligneuses qui retiennent le sol sont détruites par défrichage et sont remplacées par des espèces adventices qui favorisent l'érosion éolienne (OSS, 2004). Les faibles rendements obtenus à partir de la culture céréalière pluviale (< 5 qx/ha) ne compensent pas les pertes en terres qui en résultent (Nedjraoui, 2002).

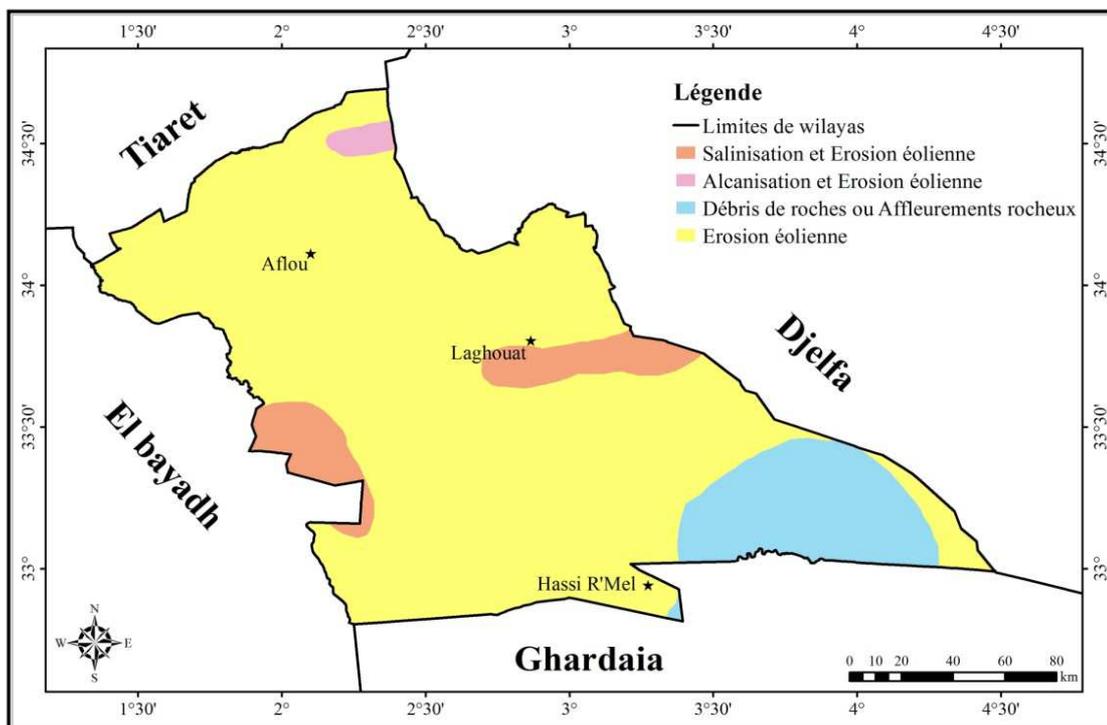


Figure 21. Carte des risques de la dégradation des terres dans la wilaya de Laghouat (Dérivée de FAO-UNESCO-UNEP, 1980)

L'érosion provoque également d'importantes pertes de la fertilité des terres qui sont estimées à 4 quintaux de blé/hectare sur la SAU labourée, 100 unités fourragères/ha (1 UF = 1 kg orge) dans les jachères et 300 UF/ha dans l'ensemble des parcours de l'Algérie (HCDS, 2010 ; MADR, 2006 ; MATE, 2006). L'érosion éolienne seule menace la dégradation de près de 200.000 hectares (80 %) des terres de la wilaya de Laghouat (DGF, 2004). La forte pression sur le milieu a engendré non seulement une rupture de son équilibre ou bien des transformations socio-économiques, mais une dynamique d'un paysage nouveau est entrain de se façonnée dans ce territoire vulnérable.

Chapitre 3

Effet de la mise en culture en pluviale sur la dégradation du sol par érosion éolienne dans la région de Laghouat

L'objectif du travail présenté dans ce chapitre est de quantifier l'érosion éolienne engendrée par une pratique agricole très répandue depuis des décennies dans la steppe algérienne qui est la mise en culture en pluviale des terres. Pour cela, un morceau de sol steppique était initialement dans son état naturel, il a été dénudé de sa végétation naturelle, défriché, cultivé en orge (*Hordeum Vulgare*) sans apports de fertilisants et en pluvial. L'étude expérimentale a été réalisée dans la région de Laghouat.

1. Matériels et méthodes

1.1. La zone lieu de l'étude

Localisée sur le piémont saharien dans la commune de Laghouat, la zone lieu de l'étude appelée bled El Hirane (33°49'0.01"N, 2°49'0.01" E, 788 mètres) est une zone de formations sableuses constituées de dépôts du quaternaire actuel. L'aménagement de la haute surface a donné naissance à la plaine alluviale de bled El Hirane (IAP, 1972), couverte d'un matériau sablo-limoneux facilement mobilisable par les vents (Taibi, 1997). La zone est limitée au nord par l'Oued M'zi, et à l'Est par Djebel Ahmar appelé communément Kaf Mokrane (883 m) attribué au Crétacé et à l'Ouest par la commune de Kheneg et par Djebel Oum Deloua (1023 m) attribué aussi au Crétacé et (Figure 22).

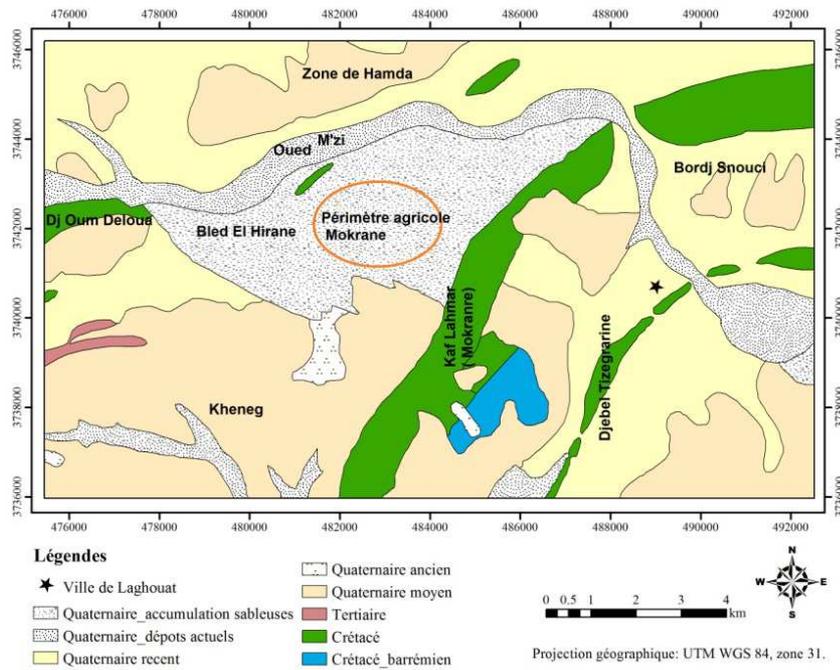


Figure 22. Formations géologiques et localisation de la zone lieu de l'étude (Dérivée de la carte géologique de Laghouat ICA, 1984)

1.2. Champ expérimental

Le champ expérimental est localisé dans le périmètre agricole de Mokrane, à 4 km à l'ouest de la ville de Laghouat (figure 22). Il est situé dans bled El Hirane à plus de 2500 m de l'oued M'zi. Le périmètre agricole a été créé dans le cadre de l'accession à la propriété foncière agricole (APFA) (loi 83-18 du 13 août 1983), et est occupé depuis 1984 par 45 agriculteurs exploitant chacun une superficie d'environ 5 ha. Actuellement le périmètre agricole Mokrane est en extension suite à la circulaire interministérielle du 23 février 2011 (Nos observations).

En Décembre 2008, le champ expérimental (figure 23), jamais cultivé auparavant, a été défriché selon les pratiques usuelles locales. Il a été débarrassé de sa végétation naturelle et nivelé au moyen d'un bulldozer. Avant sa mise en culture, il était occupé par une variété d'espèces végétales (Chapitre 5). Le champ est délimitée au NW et NE par des zones de végétation steppique naturelle similaire à celle qui occupait la parcelle avant sa mise en culture. Ce champ est orienté selon sa longueur dans le sens des vents dominants (NW) associés à des vents de sable.

1.3. Dispositif de mesures

Le dispositif de mesures se compose d'une part d'une station météo (Figures 24 et 25) et d'autre part d'un dispositif de mesures pour les flux de sédiments (Figures 26 et 27). Les flux de sédiments éoliens ont été mesurés au moyen de capteurs de sable de type Big Spring Number Eight (BSNE ; Fryrear ,1986) montés à différentes hauteurs à savoir 0,1 m, 0,175 m, 0,3 m, 0,5 m et 1 m par rapport au niveau du sol (Figure 27).

Seule la moitié nord du champ expérimental a été suivie. La parcelle cultivée de dimensions 90 m de large et 150 m de long est entourée de mâts équidistants de 15 m (Figure 23).

Pendant 3 années consécutives, le 31 Décembre 2008, le 31 Décembre 2009 et le 06 Octobre 2010, le champ a été semé avec de l'orge (*Hordeum vulgare*). Le semis a été réalisé à la volée après préparation du sol sur 15 cm au moyen d'un cultivateur à disque de type 'cover crop'. La culture a été menée sans irrigation ni fertilisation, ce qui est la pratique usuelle pour l'orge dans la région de Laghouat.

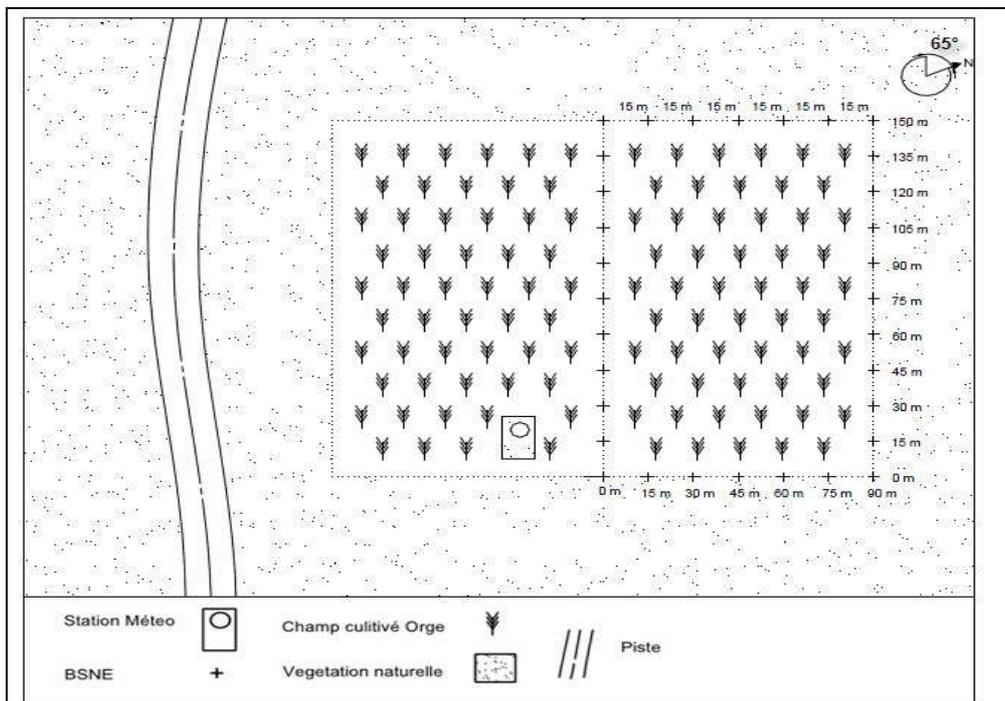


Figure 23. Parcelle expérimentale et dispositif de mesure

1.3.1. Données météorologiques

Une station météorologique est placée dans le champ et est composée d'un système d'acquisition de données de type CR1000 (Campbell Scientific) qui permet la collecte et l'enregistrement des données, elle est munie d'un système d'alimentation composé d'un panneau solaire alimentant une batterie de 12 volts et de toute une série de capteurs (Figure 24). Le système d'enregistrement est un hardware qui comprend le programme d'enregistrement et de l'espace de stockage. Tous les instruments sont interrogés de manière individuelle toutes les 10 secondes mais le système enregistre les données selon 2 fréquences distinctes. Le système stocke de manière systématique une valeur moyenne toutes les 15 minutes. L'enregistrement peut cependant avoir lieu pour chaque minute si au moins une des conditions suivantes est remplie :

- basculement de l'auget du pluviomètre,
- présence de saltation,
- vitesse seuil du vent à 3,64 m de hauteur supérieure à 6 m s^{-1} au cours de la minute écoulée.

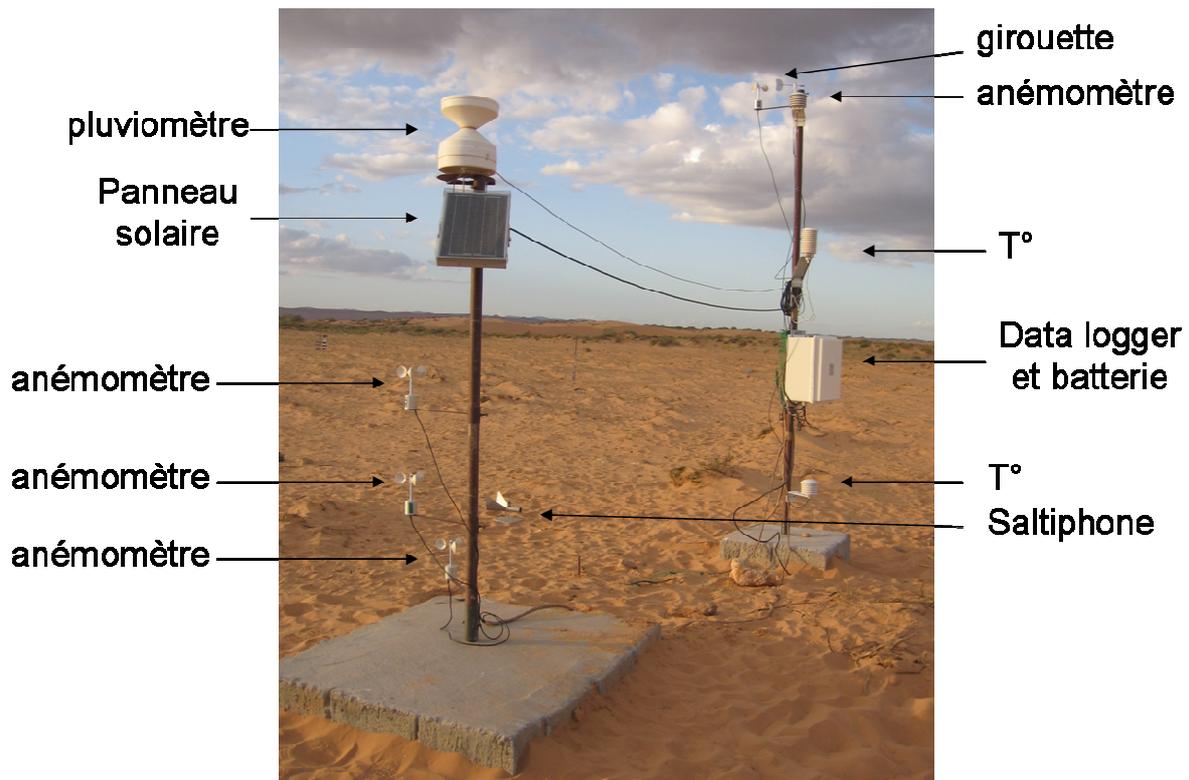
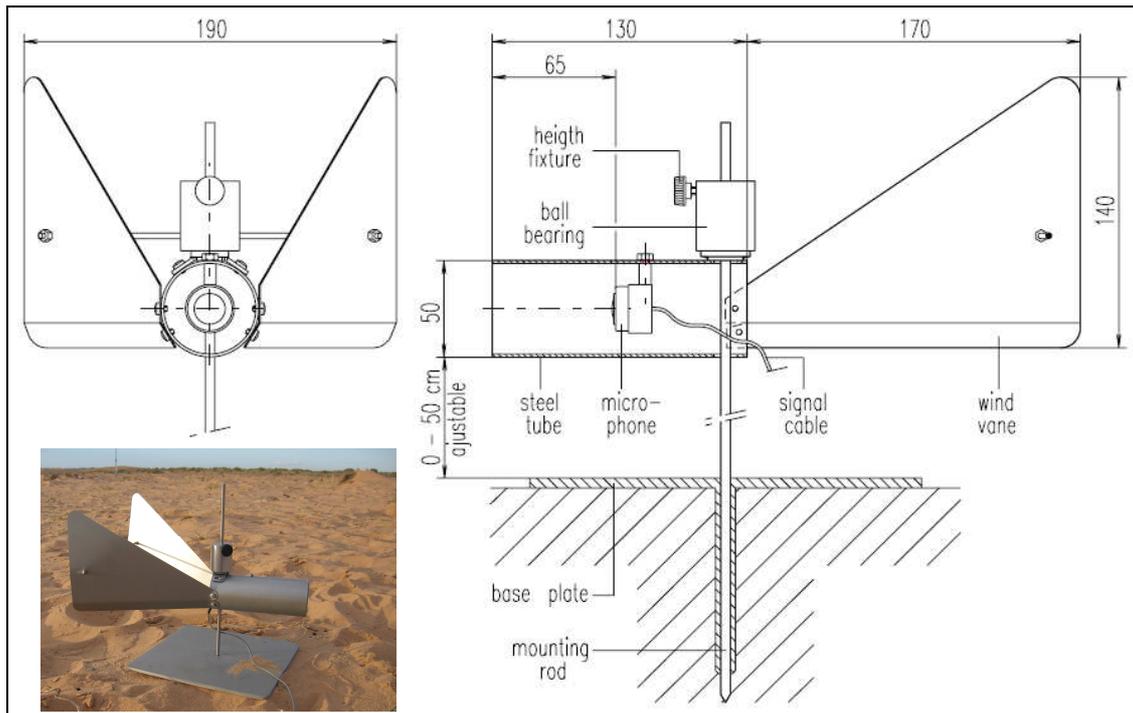


Figure 24. Représentation de la station météo dans le site expérimental

Les capteurs branchés sur la station sont les suivants :

- quatre anémomètres (Campbell A 100 R) placés à 0,45 m, 0,75 m, 1,1m et 3,64 m au-dessus du niveau du sol. Ils servent à établir les profils du vent.
- une girouette (W200P) située à 3 m du sol afin de connaître la direction des vents,
- un pluviomètre à auget basculeur qui surplombe le sol de 2 m où chaque basculement représente 0,2 mm de pluie,
- deux sondes de température situées environ 0,6 m et 2,2 m du sol,
- un Saltiphone ® (Spaan et Van den abele, 1991) placé à 10 cm du sol, servant à déterminer les périodes de saltation (Figure 25). C'est un capteur acoustique qui enregistre l'impact des particules de sable sur un microphone placé à l'intérieur d'un tube creux de 50 mm de diamètre. Deux ailettes équipent le tube qui pivote sur un axe vertical permettant à l'ouverture du tube d'être toujours face au vent. Chaque impact d'une particule produit une impulsion de 1 milliseconde (ms). Donc si deux particules viennent heurter le microphone à moins de 1 ms d'intervalle, le système n'enregistrera qu'une seule impulsion. Les particules de sable plus larges que 50 μm qui heurtent la membrane produisent un bruit à une certaine fréquence qui peut être distingué du bruit du vent et de la pluie (Eijkelkamp, 2003). Pour des raisons techniques d'enregistrement, le nombre de coups par minute enregistré est de maximum 7999. Pour toutes ces raisons, les informations tirées par le saltiphone sont de type qualitatives plutôt que quantitatives.



**Figure 25. Représentation schématique d'un saltiphone (Source : Eijkelkamp, 2003).
 Dans le coin inférieur gauche, saltiphone dans son environnement de mesure.**

Les données enregistrées toutes les 15 minutes sont la vitesse moyenne du vent aux différentes hauteurs en $m.s^{-1}$, la direction du vent exprimée en degrés et la température en $^{\circ}C$. Celles enregistrées chaque minute (s'il y a lieu) sont la vitesse moyenne du vent à 3,64 m au cours de la minute écoulée, la direction du vent, le nombre de basculements du pluviomètre et l'intensité de la saltation exprimée en coups par minute.

1.3.2. Capteurs de sable

La quantification des flux de sédiments a été faite au moyen des capteurs de type Big Spring Number Eight (BSNE ; Figure 26) (Fryrear, 1986). Ce modèle de capteur a été utilisé dans nombreuses études (Lancaster et Baas, 1998 ; Biolders *et al.*, 2000, 2002, 2004 ; Van Pelt *et al.*, 2004 ; Rajot *et al.*, 2003, 2009 ; Ikazaki *et al.*, 2014).

Le modèle BSNE standard, est formé de deux parties trapézoïdales qui s'emboîtent l'une dans l'autre pour en assurer l'étanchéité. La partie basale sert pour la collecte de sédiments. La partie supérieure possède une ouverture qui est située sur la plus petite face (face avant) ainsi qu'une grille fine sur la partie supérieure qui retient les sédiments tout en laissant passer l'air. Le flux d'air chargé en sédiments pénètre par l'ouverture sur la petite face. La vitesse du flux diminue car la section augmente ce qui permet la sédimentation des particules.

De plus petits capteurs avec une ouverture de 2 cm² (2 x 1 cm) sont aussi utilisés et sont alors uniquement composés d'une partie basale servant à la collecte de sédiments et d'un couvercle pour étanchéifier. Deux grilles latérales servent à l'évacuation du flux d'air et au piégeage des sédiments.

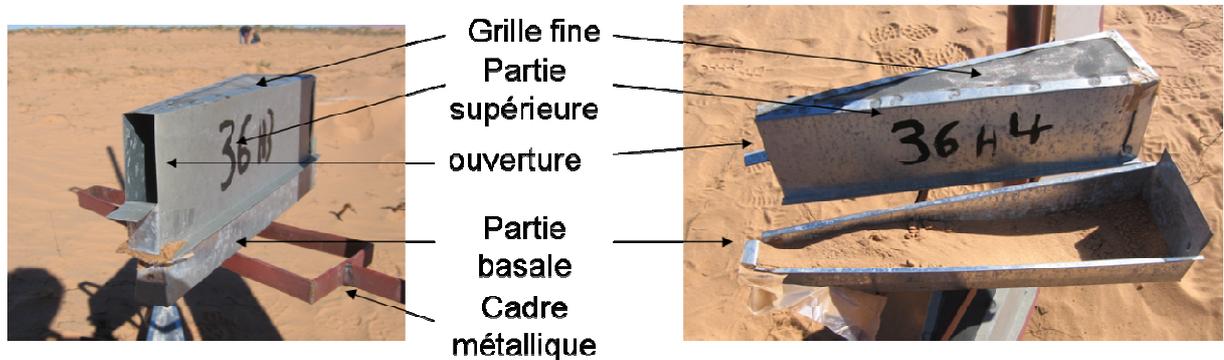


Figure 26. Capteur de sable standard de type BSNE. La partie basale sert de collecte aux sédiments. Sur la partie supérieure, une grille fine pour piéger les sédiments en laissant l'air passer.

Chaque capteur est posé sur un cadre métallique qui repose sur un mât vertical cylindrique en acier. Une bague serrée sur le mât sur laquelle repose le cadre métallique permet de régler la hauteur de mesure tout en permettant la rotation autour du mât. Le premier capteur, le plus petit, est suspendu au moyen de fils de fer sur le deuxième. Ces deux capteurs reposent donc sur la même armature. Un aileron formé d'une plaque en inox avec 2 montants en bois permet aux capteurs et donc aux ouvertures de s'orienter face au vent à l'instar d'une girouette, cet aileron permet également d'augmenter considérablement la surface de la girouette (figure 27). Cela va permettre d'une part une meilleure orientation, même pour de faibles intensités de vent, et d'autre part une réponse plus rapide et homogène de l'ensemble des capteurs.

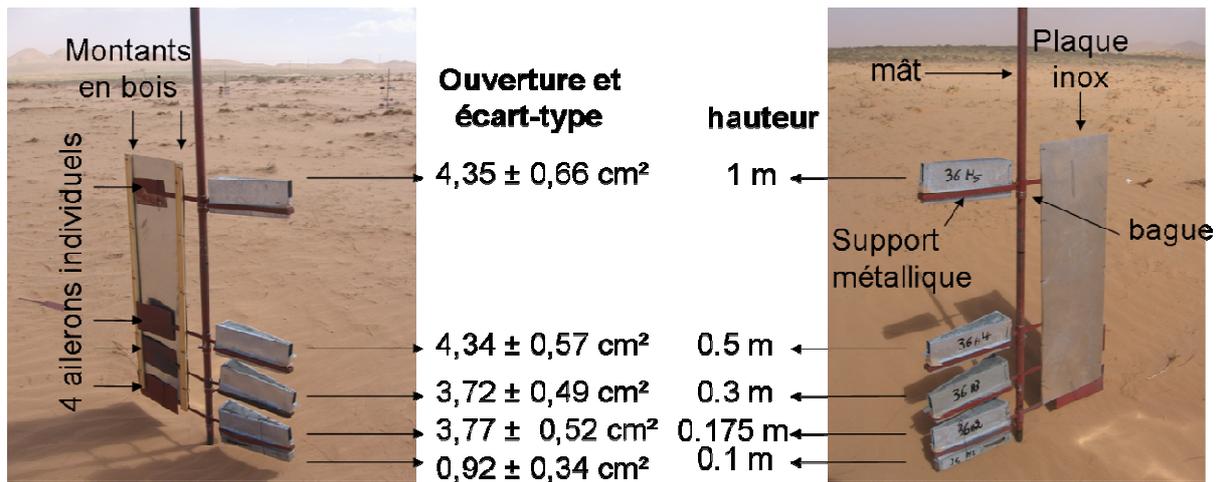


Figure 27. Dispositif de mesure au champ composé d'un mât sur lequel 5 capteurs BSNE reposent sur 4 supports métalliques. Les 4 ailerons sont solidarisés par une plaque inox pour permettre une meilleure rotation. L'ouverture représente la moyenne des ouvertures et leur écart-type.

Au total, un petit capteur et 4 capteurs standards sont positionnés sur chaque mât permettant le calcul du flux de masse. Les hauteurs ainsi que la taille des ouvertures ont été modifiées au terme du premier évènement érosif (non mesuré) car la quantité de sédiments était trop importante et saturait complètement les capteurs qui ne donnent alors plus d'informations pertinentes. L'ensemble des capteurs sont maintenus au moyen de fil de fer sur leur support pour ne pas être emportés par les vents violents.

L'efficience des capteurs est considérée comme étant proche de 1 (Fryrear, 1986). Les avantages des capteurs de type BSNE sont d'être très robustes, ce qui leur assure une durée de vie importante. Ils permettent également la collecte de quantités importantes de sédiments pour de faibles évènements érosifs ce qui permet l'obtention d'échantillons de masse suffisants pour pouvoir effectuer des analyses chimiques et granulométriques ultérieures.

L'ensemble du dispositif (capteur et support) a été réalisé de manière manuelle par les techniciens du département de mécanique de l'Université Amar Thelidji de Laghouat.

Les mâts supportant les BSNE (Figure 27) sont placés sur tout le pourtour de la parcelle et équidistants de 15 m (Figure 23).

1.4. Epaisseur de l'horizon superficiel du sol du champ

Un profil du sol du champ expérimental a été effectué, ce profil montre une couche sableuse qui surmonte une couche limoneuse à forte charge caillouteuse (Figure 28). Une série d'échantillons sur une épaisseur de (0-2cm), ont été pris sur l'ensemble de la parcelle expérimentale en suivant un maillage réalisé à l'intérieur du champ. Les échantillons sont prélevés tous les 15 m à l'intérieur de la parcelle cultivée.

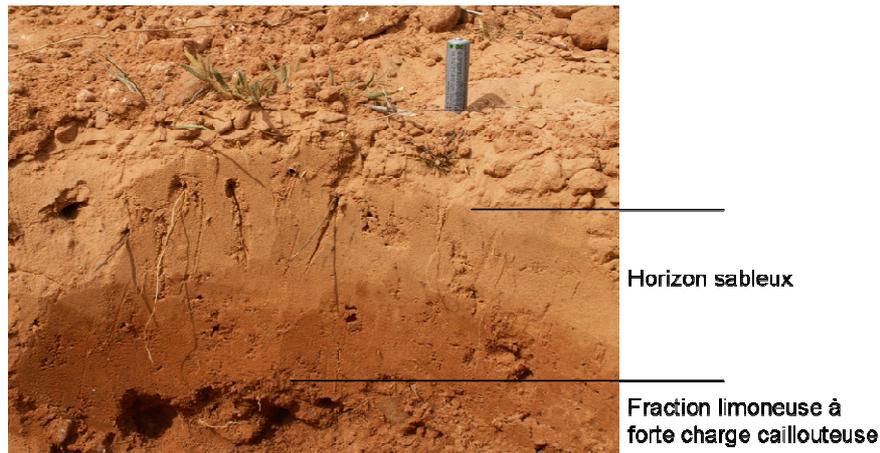


Figure 28. Profil de sol de Laghouat (Cliché : Biielders, Mars 2009).

Sur les échantillons relevés du sol, des analyses sont réalisées, à savoir la granulométrie, le dosage des carbonates, N_{tot} et C_{tot} ainsi que des éléments majeurs (N, P, K, Ca, Al, Fe, Mg, Mn, Na).

1.5. Analyses de sol

Les analyses de sol ont été effectuées aux laboratoires de sciences du sol à l'université catholique de Louvain (Belgique). L'ensemble des échantillons prélevés sur la parcelle expérimentale ont été soumis aux analyses suivantes.

1.5.1. Granulométrie

La fraction inférieure à 2 mm de l'ensemble des échantillons a subi une analyse granulométrique. 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_2O_2 , 6 %) et 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.

Les sables sont séparés des argiles et limons par tamisage à 50 µm et passage aux ultrasons pour décoller les particules d'argile qui seraient adsorbées. A la fraction restante, recueillie dans un cylindre gradué de 1 litre, est adjoint 10 ml d'hexamétaphosphate (HMP). La solution est homogénéisée puis 20 ml de cette solution sont prélevés, une première fois au milieu de la colonne d'eau directement après homogénéisation, une seconde fois à 10 cm sous le niveau de l'eau après 4 minutes et 48 secondes de décantation et pour finir à 30 cm sous le niveau de l'eau après 24 h de décantation. Ces différentes fractions sont séchées à l'étuve à 105°C durant 48 heures avant d'être pesées. Par la loi de Stokes, il est possible de connaître la fraction de limons grossiers, limons fins et argiles présente dans la solution et donc dans notre échantillon.

Dans un second temps, la fraction sableuse supérieure à 50 µm, récupérée précédemment, est tamisée sur des tamis de 1000 µm, 850 µm, 595 µm, 420 µm, 250 µm et 100 µm afin de déterminer les différentes classes de sable présentes. Les classes de sable que nous prendrons en compte sont celles proposées par l'USDA.

- sable très fin, entre 50 µm et 100 µm,
- sable fin, entre 100 µm et 250 µm,
- sable moyen, entre 250 µm et 500 µm,
- sable grossier, entre 500 µm et 1000 µm
- sable très grossier, entre 1000 µm et 2000 µm.

1.5.2. Carbonates de Calcium

Le CaCO₃ a été dosé par titrimétrie par la méthode Marcour. Cette méthode de dosage comporte une attaque de l'échantillon (environ 2 grammes) par l'acide sulfurique (25 ml d'H₂SO₄, N/2) et un titrage en retour par du NaOH (N/2) en présence d'indicateurs judicieusement choisis à savoir la phénolphthaléine et un indicateur mixte (rouge de méthyl et vert de bromocrésol).

1.5.3. pH

Le pH est mesuré sur 5 grammes de sol tamisé à 2 mm mis en solution dans 25 ml d'eau

déminéralisée. Les échantillons sont agités toutes les 20 minutes et la mesure du pH est réalisée directement après la troisième agitation au moyen d'un pHmètre (inoLab pH720, WTW series).

1.5.4. Eléments majeurs

La première étape consiste à minéraliser les sols. Pour ce faire, 6 ml d'acide nitrique et 10 ml d'acide fluorhydrique sont ajoutés à $\pm 0,3$ g de chaque échantillon de sol. Après une nuit sur plaque chauffante, 10 ml d'acide perchlorique sont ajoutés. Après une attaque à l'eau régale (2 ml d' HNO_3 + 6 ml d' HCl), suivie d'un bref passage sur plaque chauffante, les récipients ont été nettoyés à l'eau milliQ et leur contenu transvasé dans des jaugés de 50 ml portés au trait de jauge. Après filtration sur Whatman®, les échantillons sont passés à la torche à plasma, ce qui permet de doser la teneur en éléments minéraux.

15.5. Azote total (N_{tot}), carbone total (C_{tot}) et matières organiques

Pour le dosage de l'azote et du carbone total, le principe se base sur une oxydation du carbone et de l'azote en CO_2 et N_2 par chauffage dans un courant d'oxygène. Cette réaction est catalysée par du cuivre. Les éléments sont séparés sur une colonne de chromatographie sous un courant d'hélium. Le détecteur mesure la conductivité thermique.

Le dosage des matières organiques (C_{org}) se fait sur base de la différence entre le (C_{tot}) et les carbonates en supposant que le sol ne possède pas d'autre source de carbone. La quantité de matières organiques est obtenue en multipliant la concentration en C_{org} par un facteur de 1,8 (Mathieu et Pieltain, 2003).

1.6. Méthodologie d'exploitation des données

1.6.1. Caractérisation des évènements éoliens

1.6.1.1. Détermination du nombre et de la durée des évènements érosifs

Cette étape est essentiellement basée sur les données du saltiphone. L'évolution du nombre d'impacts enregistrés en fonction du temps nous permet de visualiser les périodes où le transport s'opère. Nous nous sommes basés sur le fichier de la station météo qui enregistre minute après minute. Pour rappel, ce type d'enregistrement n'a lieu que si la vitesse du vent est supérieure à $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, si la saltation est en cours ou s'il y a basculement de l'auget du

pluviomètre.

Dans notre étude, un événement éolien a été défini comme suit : Un événement débute quand le premier enregistrement de saltation est ≥ 10 coups/min et il continue si au cours de l'heure du temps qui suit, au minimum une fois une valeur ≥ 60 coups/min est enregistrée. L'événement finit au moment du dernier enregistrement de saltation ≥ 10 coups/min, si pendant une heure de temps qui suit, aucun enregistrement de saltation ≥ 60 coups/min n'est observé.

1.6.2. Calcul de la vitesse seuil de saltation

L'érosion éolienne se produit quand la vitesse du vent dépasse une certaine valeur critique dite vitesse seuil, la valeur de ce paramètre est influencée par l'état de surface du sol et est très déterminante dans les estimations des transports éoliens (Marticorena *et al.*, 1997 ; Fryrear *et al.*, 2000 ; Schonfeldt, 2003). D'autre part les méthodes de mesures de la vitesse seuil de l'érosion éolienne sont diverses et peuvent présenter un impact très important dans les calculs des transports éoliens (Barchyn et Hugenholtz, 2011). La méthode adoptée dans notre cas consiste à utiliser la représentation sous forme graphique du logarithme népérien de la saltation en fonction de la vitesse du vent à 3,64 m (Tidjani, 2008). Cette représentation affiche une relation approximativement linéaire. Par translation de la droite de régression, l'ordonnée à l'origine de la droite estimée va être diminuée de manière à placer plus de 95 % des observations au dessus de cette droite. L'identification de la vitesse seuil nécessite le choix d'une intensité de saltation à partir de laquelle on considère que la saltation est effective et significative. Ce seuil est choisi comme étant de 1 coup par seconde, soit 60 coups par minute. Afin de mieux observer le phénomène à l'initiation du processus, seules les données avec moins de 1000 coups de saltation par minute seront prises en compte. La vitesse seuil de saltation correspond à la valeur de l'ordonnée pour un seuil de saltation de 60 coups par minute sur la droite précédemment ajustée (figure 29).

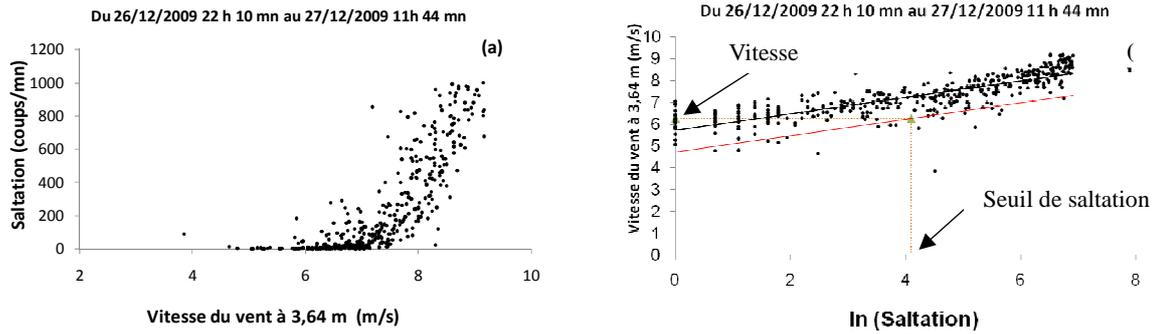


Figure 29. (a) représentation de la saltation en fonction de la vitesse du vent ; (b) détermination de la vitesse seuil de saltation au moyen du logarithme népérien de la saltation en fonction de la vitesse du vent.

1.6.3. Calcul de la vitesse et de la direction moyenne du vent

La connaissance de la direction des vents est très importante dans le domaine de l'érosion éolienne, c'est un paramètre très déterminant pendant les mesures de l'action du vent sur le sol (Skidmore, 1965 ; Skidmore et al, 1966 ; Lancaster, 2004 ; Liu *et al.*, 2005 ; Rajot *et al.*, 2009 ; Ikazaki, 2010) aussi bien que dans les cas de planification de la lutte contre les effets néfastes du vent sur les espaces (Chepil *et al.*, 1964 ; Zhang *et al.*, 2007). La détermination du début et de la fin des événements éoliens se fait dans le fichier des *enregistrements* de la station météo effectués chaque minute. Une fois l'événement éolien identifié on procède aux calculs de sa vitesse moyenne du vent et de sa direction moyenne respective. Les processus éoliens sont complexes car la durée, l'intensité et la direction des vents ne sont pas constants. Nous supposons que durant une durée de temps infiniment courte la direction du vent est variable et par conséquent les moyennes de la direction et de la vitesse du vent durant chaque événement érosif ou durant la période constituée de plusieurs événements érosifs sont des moyennes vectorielles et sont calculées suivant les équations 4 et 5.

$$\overline{Dir_{ev}} = \text{Arctg} \left[\frac{\sum_{i=1}^n \sin(\alpha_i)}{\sum_{i=1}^n \cos(\alpha_i)} \right] \quad \text{Equation 4}$$

Où : $\overline{Dir_{ev}}$ = Direction du vent de l'événement ;

α_i = Direction enregistrée à la minute i pendant l'événement érosif ;

n = Nombre de minutes déterminés pendant l'événement érosif.

L'équation (4) est utilisée, par la suite pour le calcul de la une moyenne vectorielle Equation (5), pour toute une période représentée par plusieurs événements :

$$\overline{Dir_{période}} = \text{Arctg} \left[\frac{\sum_{i=1}^n \sin(\overline{Dir_{ev_i}})}{\sum_{i=1}^n \cos(\overline{Dir_{ev_i}})} \right] \quad \text{Equation 5}$$

Où $\overline{Dir_{période}}$, Direction moyenne du vent pendant la période considérée

$\overline{Dir_{ev}}$, Direction moyenne du vent pendant l'événement i ;

n , nombre d'événements érosifs déterminés pendant la période considérée.

1.6.4. Calcul des flux de sédiments de la parcelle

Les capteurs BSNE ont été vidangés périodiquement, chaque période étant généralement composée de plusieurs événements éoliens, il s'agit donc d'un cumul de sédiments. Après séchage à l'air, les sédiments collectés ont été pesés avec une balance précise à 0.1 g. Les quantités de sédiments récoltées à la hauteur 1m étaient généralement très faibles, voire trop faibles pour pouvoir être quantifiées avec précision. Ces capteurs n'ont donc pas été retenus dans le calcul des flux. Et donc uniquement les sédiments captés par les BSNE placés entre 0.1 m et 0.5 m vont servir aux calculs des flux.

Nombreux modèles sont proposés pour estimer les flux éoliens horizontaux, ils ont été utilisés de manière satisfaisante dans plusieurs études (Sterk et Raats, 1996 ; Stout et Zobeck, 1996 ; Biolders *et al.*, 2000,2001, 2002 ; Visser *et al.*, 2003 ; Zobeck et Scott, 2006 ; Li et al 2007 ; Dong et Qian, 2007 ; Rajot *et al.*, 2009 ; Ikazaki *et al.*, 2010 ; Mendez *et al.*, 2011). Ces modèles sont basés soit sur des fonctions de puissance (e.g., Zingg, 1953 ; Ni *et al.*, 2002), soit sur des fonctions exponentielles (e.g. , Nickling, 1988 ; Vories et Fryrear, 1991 ; Fryrear et Saleh, 1993 ; Greeley *et al.*, 1996), soit encore sur une combinaison de ces deux formulations (e.g. , Sterk et Raats, 1996). Les modèles combinés requièrent la détermination de 4 à 5 paramètres. Avec seulement 4 capteurs par mât, la détermination d'un si grand nombre de paramètres n'est pas possible. Les modèles de type exponentiel ou fonction de puissance peuvent être limités à deux paramètres et sont donc en principe applicables à nos données. Cependant, lors de l'analyse de nos données, l'ajustement de ces modèles sur les profils de flux mesurés n'a pas permis d'obtenir des résultats satisfaisants pour une majorité de cas. Pour cette raison, le flux est calculé par intégration par la méthode des trapèzes entre deux capteurs successifs (Figure 30). La méthode d'intégration fait l'hypothèse que le profil de densité de flux de sédiments entre deux capteurs successifs d'un même mat peut être représenté par une fonction de puissance (Equation 6), mais que les paramètres de l'équation varient avec la hauteur.

$$q(z) = q_0 \left(1 + \frac{z}{\sigma}\right)^p$$

Equation 6

où $q(z)$ et q_0 sont la densité de flux horizontal cumulé (kg m^{-2}) à une hauteur z et à la hauteur $z = 0$ m, respectivement, et σ (m) et p (adimensionnel) sont deux coefficients de l'équation.

σ est fixé à 1 (Sterk et Raats, 1996). Ainsi, les paramètres q_0 et p sont estimés entre 0.10 et 0.175 m, entre 0.175 et 0.3 m et entre 0.3 et 0.5 m.

Le flux de sédiments cumulés ($Q_{i,i+1}$; kg m^{-1}) entre le capteur i et le capteur $i+1$ est donné par intégration de l'équation 6 :

$$Q_{i,i+1} = \left[\frac{q_0 (z+1)^{p+1}}{p+1} \right]_{z_i}^{z_{i+1}} = \frac{q_0}{p+1} \left[(z_{i+1}+1)^{p+1} - (z_i+1)^{p+1} \right]$$

Equation 7

où z_i et z_{i+1} correspondent à la hauteur des capteurs i et $i+1$, respectivement. Les paramètres q_0 et p sont déterminés par régression linéaire après linéarisation de l'équation 7 :

$$\ln(q(z)) = \ln(q_0) - p \cdot \ln(1 + z)$$

Equation 8

Pour l'estimation du flux cumulé entre 0 et 10 cm de hauteur, l'équation 8 a été extrapolée jusqu'à $z = 0$ m à partir des mesures de densité de flux à 0.1 et 0.175 m. Pour chaque mât, le profil de densité de flux cumulé est donc intégré entre 0 et 0.5 m de hauteur.

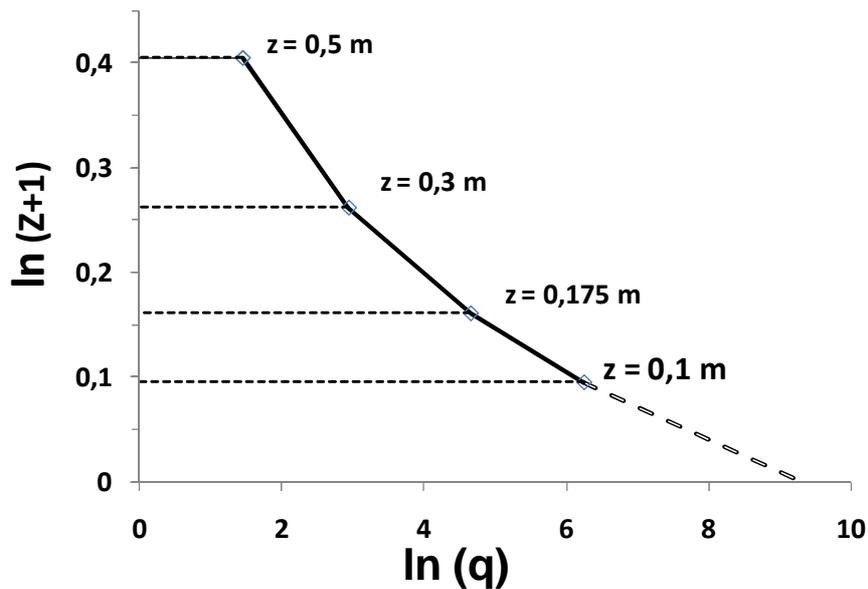


Figure 30. Exemple d'intégration du profil par la méthode des trapèzes.

1.6.5. Calcul du bilan de masse de sédiments de la parcelle

Connaissant les directions moyennes des vents érosifs et les flux cumulés de sédiments éoliens, les bilans de masse sont calculés pour chacune des périodes par les différences entrées/sorties, et ainsi donc les pertes ou gains en sédiments sont déterminés pour l'ensemble de la parcelle cultivée.

Le bilan de masse de sédiments la parcelle (kg/ha) a été établie en appliquant l'équation de la conservation de la masse à la parcelle. Il est obtenu en faisant la différence entre les flux cumulés ($M_{c.in}$) de sédiments entrants et les flux cumulés ($M_{c.out}$) de sédiments sortants (Equation 9) :

$$\Delta M = \frac{(M_{c_x,in} + M_{c_y,in}) - (M_{c_x,out} + M_{c_y,out})}{S} \quad \text{Equation 9}$$

Où :

S est la superficie de la parcelle (ha), les indices *in* et *out* indiquent respectivement un flux entrant et un flux sortant. Les indices *x* et *y* correspondent au flux de masse dans la direction

considérée (x : largeur de la parcelle et y : longueur de la parcelle).

L'application de l'équation 17 en pratique nécessite (Biolders *et al.*, 2001 ; Tidjani, 2008 ; Ikazaki *et al.*, 2010) : 1) Pour chacun des 4 côtés de la parcelle et sur base de la direction moyenne vectorielle du vent, la détermination si le coté est traversé par des flux entrants ou sortants. 2) Pour chaque mât, la décomposition du flux de sédiment en deux vecteurs orthogonaux, dont un est perpendiculaire au côté de la parcelle. Seuls ces derniers sont pris en compte, l'autre composante ne contribuant pas aux flux entrant ou sortant. 3) Entre deux mâts successifs, le calcul de la masse de sédiment entrante ou sortante en multipliant le flux moyen par la distance séparant les deux mâts. Ceci revient à faire une interpolation linéaire entre deux mâts successifs. 4) La somme des masses de sédiment entrantes ou sortantes. Au final, les deux équations 18 et 19 sont obtenues.

$$M = \sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{Q_i + Q_{i+1}}{2} \right) \times l \times \sin(\alpha) \quad \text{Equation 10}$$

$$M = \sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{Q_i + Q_{i+1}}{2} \right) \times l \times \cos(\alpha) \quad \text{Equation 11}$$

Où :

M représente la quantité de sédiments entrants ou sortants de la parcelle entre 2 capteurs

Successifs [kg] pour une période,

Q_i , le flux cumulé de sédiments pour le capteur i [kg/m par période],

l , la distance entre 2 capteurs successifs ; elle est de 15 m dans notre cas,

α , la direction moyenne du vent érosif ($^\circ$) de la période considérée.

A partir du 08 Février 2010, et en raison d'une panne au niveau du saltiphone, ce dernier ne répondait plus aux impulsions des sédiments. Le travail a été poursuivi sans mesures de Saltation. Afin de combler le manque de données de saltation, la vitesse seuil de saltation caractérisée au cours de la période qui précédait le 8 février 2010, a été utilisé pour identifier les périodes de saltation. Des analyses de sensibilité des paramètres de l'érosion éolienne ont été utilisées dans le traitement de données.

Les résultats seront donc présentés en deux temps, tout d'abord la série des résultats de mesures effectuées avec enregistrements de la saltation (Du 04 Mars 2009 au 08 Février 2010) et la deuxième est celle des résultats de mesures effectuées sans enregistrements de la saltation (Du 22 Février 2010 au 14 Mai 2011).

2. Résultats

2.1. Caractéristiques physico-chimique du sol de la parcelle

Les teneurs moyennes en éléments majeurs, en carbonates et la répartition des différentes classes granulométriques obtenues sur base des échantillons sont présentées au tableau 5.

Tableau 5. Teneurs moyennes en éléments majeurs, et classe granulométrique de la couche superficielle du sol de la parcelle expérimentale.

Elément	Moyenne et Ecart-type	Classe granulométrique	Moyenne et Ecart-type
Al (mg/kg)	7293,4 ± 2017,3	sable très grossier >1000 µm (%)	3,5 ± 5,3
Ca (mg/kg)	20264,9 ± 3622,3	sable grossier > 500 µm (%)	9,3 ± 8,4
Fe (mg/kg)	3999,7 ± 926,2	sable moyen >250 µm (%)	31,3 ± 13,0
K (mg/kg)	4132,4 ± 1278,8	sable fin >100 µm (%)	46,5 ± 13,5
Mg (mg/kg)	1334,9 ± 333,3	sable très fin >50 µm (%)	7,3 ± 4,4
Mn (mg/kg)	63,8 ± 10,8	argile et limon <50 µm (%)	2,0 ± 0,4
Na (mg/kg)	492,9 ± 154,5	limite fraction Erodible > 840 (µm)	4,9 ± 7
P (mg/kg)	147,2 ± 184,9		
N _{tot} (%)	0		
C _{tot} (%)	0,66 ± 0,11		
CaCO ₃ (%)	5,4 ± 1,1		

2.2. Climatologie de la zone d'étude

2.2.1. Températures

La figure 31 présente l'évolution des températures maximales et moyennes journalières enregistrées dans le périmètre de Mokrane entre Mars 2009 et Octobre 2011. Une saisonnalité marque la période de mesure. Peu de différences sont observées entre les trois années. Les mois les plus chauds sont Juillet et Aout avec une température moyenne mensuelle aux alentours de 31°C et des maxima qui dépassent les 40°C. A partir du mois d'Aout, les températures journalières moyennes et maximales commencent à diminuer avant de reprendre en Mars une phase d'augmentation pour atteindre les maxima au mois de Juillet et Aout. Le minimum des températures est observé au mois de Janvier 2010.

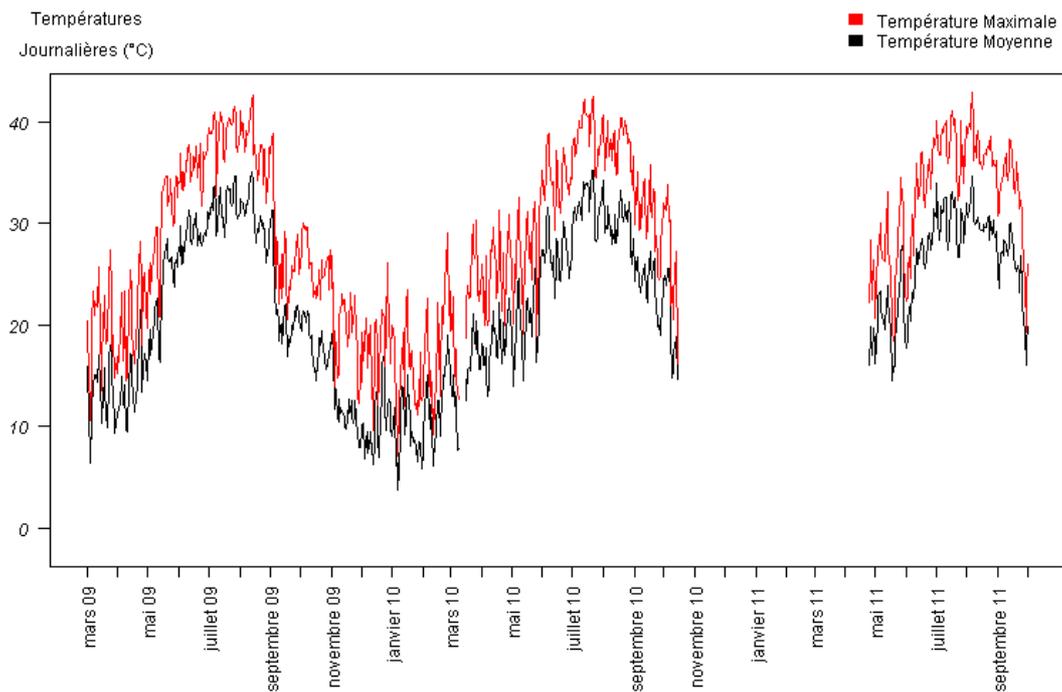


Figure 31. Evolution saisonnières des températures journalières maximales et moyennes mesurées, dans le périmètre de Mokrane, par pas de temps de 15 min.

2.2.2. Précipitations

La figure 32 présente les précipitations journalières enregistrées dans le périmètre agricole de Mokrane durant la période de mesures. Le mois le plus pluvieux est septembre 2009 avec 93,5 mm de pluie, le mois d'Octobre qui suit est le plus sec avec 1mm de pluie. Les mois de Mai et Juin 2011 sont relativement plus humides que ceux des années 2009 et 2010. Durant les trois années en saison chaude, les mois de Juillet et Aout sont relativement secs.

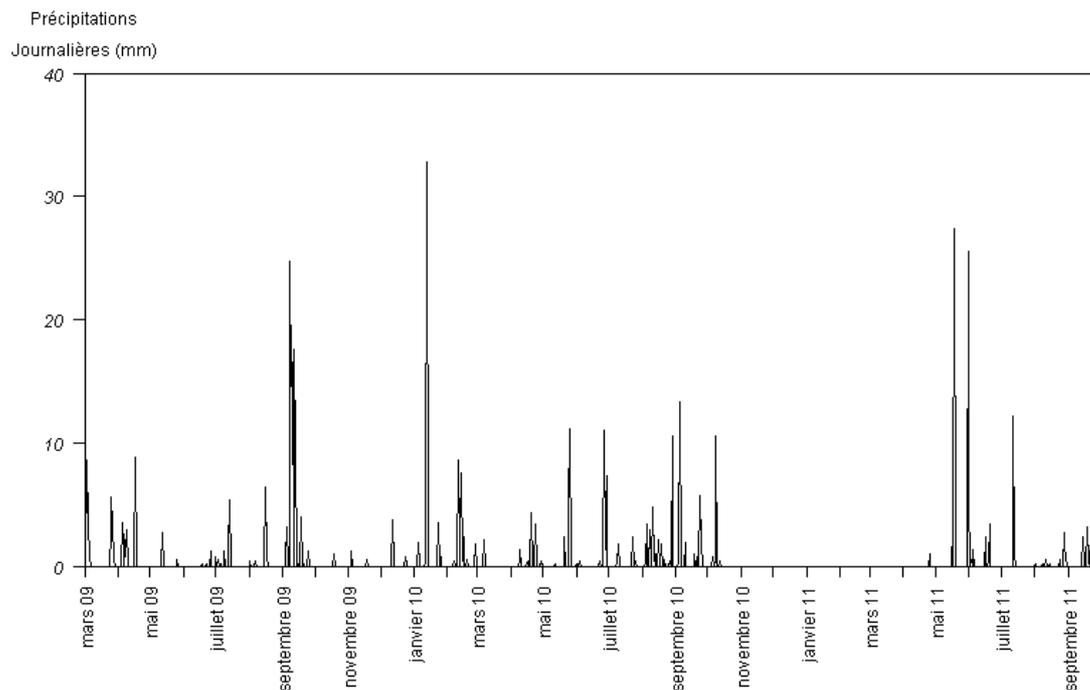


Figure 32. Evolution saisonnière des précipitations dans le périmètre de Mokrane, par pas de temps de 1 min.

2.2.3. Humidité relative

La figure 33 montre l'humidité relative de l'air journalière maximale et moyenne. Une saisonnalité marque l'évolution de l'humidité de l'air durant la période des mesures. Entre les mois d'Avril et Septembre, l'humidité relative de l'air diminue. Les plus faibles valeurs sont enregistrées entre Aout et Septembre durant les trois années de mesures. En saisons d'automne et d'hiver, entre les mois d'Octobre et de Mars, les valeurs de l'humidité relative de l'air journalière maximales et moyennes sont plus élevées que celles observées entre les mois d'Avril et Septembre.

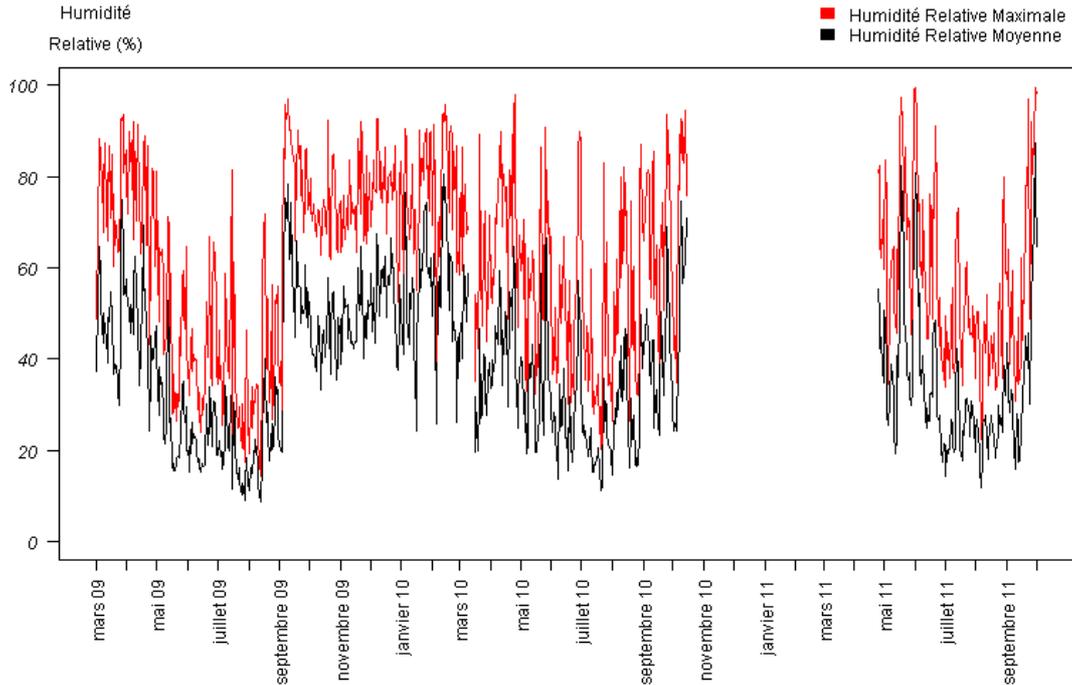


Figure 33. Variation saisonnière de l’humidité relative de l’air journalière maximale et moyenne dans le périmètre de Mokrane, par pas de temps de 15 min.

2.2.4. Vitesses du vent

La figure 34 montre la dynamique de la vitesse journalière maximale et la vitesse journalière moyenne à 3,6 m dans le périmètre agricole de Mokrane. Pour les deux paramètres, aucune saisonnalité n’est observée. Aussi bien pour la vitesse maximale journalière que pour la vitesse moyenne journalière, les amplitudes sont très variables. Apparaissent des périodes de calme en Novembre 2009 et Mars 2010 où les maxima journaliers des vitesses et les moyennes journalières des vitesses ne dépassent pas respectivement les 4 m/s et les 3 m/s. La vitesse journalière maximale est fréquemment supérieure à 6 m/s et dépasse rarement 14 m/s. Durant les périodes allant de Mai à Septembre, les vitesses journalières maximales sont relativement moins importantes par rapport à celles observées durant les autres périodes. Des vitesses maximales journalières et des vitesses moyennes relativement faibles, sont observées en saison estivale durant les mois d’Aout.

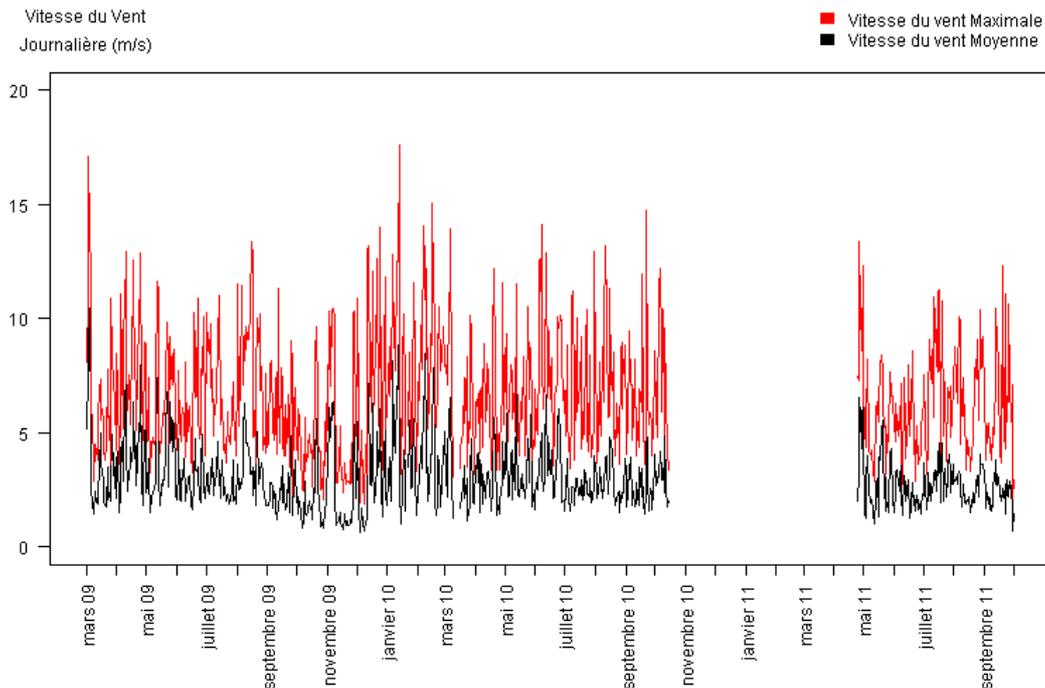


Figure 34. Dynamique de la vitesse maximale journalière du vent et de la vitesse moyenne journalière du vent mesurée à 3,6 m dans le périmètre de Mokrane, par pas de temps de 15 min.

2.2.5. Directions du vent

La figure 35 présente les fréquences des directions de vent pour différentes classes de vitesses. Les directions sont très variables, la variabilité est plus accentuée pour les classes de vitesses inférieures à 8 m/s. Pour les classes de vitesse inférieures à 4 m/s, la direction dominante est représentée par le Nord Nord-Est. En ce qui concerne les vents aux vitesses comprises entre 4 et 8 m/s leurs directions dominantes sont le Sud-Ouest et le Nord-Ouest. Pour la classe des vents aux vitesses supérieures à 8 m/s, les directions dominantes sont le Sud-Ouest, le Nord-Ouest et l'Ouest Nord-Ouest.

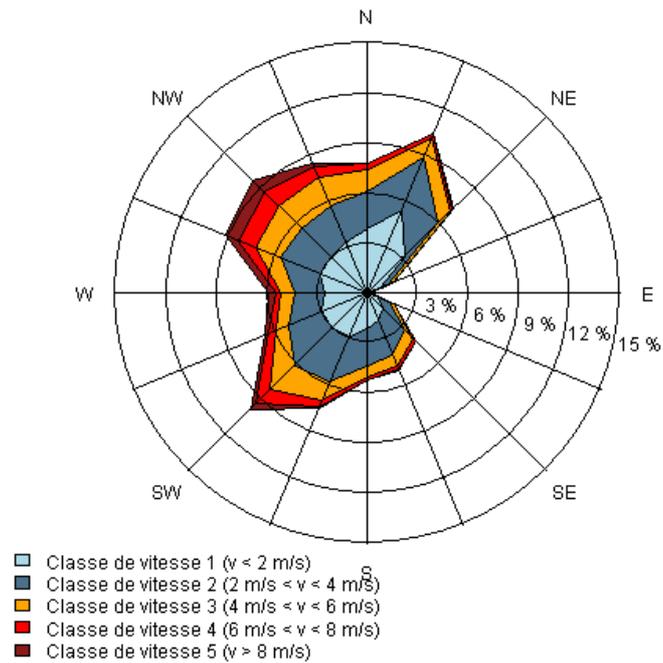


Figure 35. Fréquences des directions du vent pour différentes classes de vitesse par pas de temps de 15 min.

2.2.6. Directions du vent pendant la saltation

Du 04 Mars 2009 au 10 Février 2010, les enregistrements de la saltation pour un pas de 1 minute révèlent que 96 % de la saltation a eu lieu en des moments non pluvieux, et un taux de 4 % de la saltation a lieu sous la pluie. En présence de pluie, les impacts mesurés par le saltiphone correspondent vraisemblablement à du rejaillissement (« splash ») et non de la saltation.

La Figure 36 montre que 97 % de la saltation ayant lieu sans pluie et 94 % de la saltation ayant lieu sous la pluie sont observées pour des directions de vent oscillant entre l’Ouest et le Nord-Ouest.

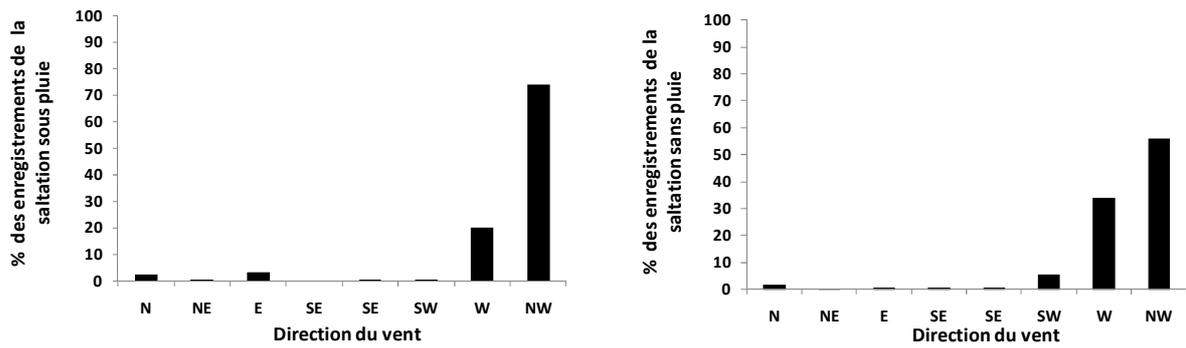


Figure 36. Directions du vent pendant la Saltation (% des observations).

2.2.7. Dynamique de la vitesse seuil de saltation

La figure 37 représente l'évolution de la vitesse seuil de saltation durant la période du 04 Mars 2009 au 08 Février 2010, par événement. Dans la représentation sont considérés uniquement les événements présentant des directions de vent ayant des moyennes vectorielles incluses dans l'intervalle Sud-Ouest à Nord (directions durant lesquelles la saltation a lieu ; figure 36) et qui ont permis d'établir la régression [vitesse du vent = Ln (saltation)] et avec la condition que le taux de la saltation qui a été enregistré sous la pluie ne doit pas dépasser 10% du total de la saltation enregistrée durant l'événement érosif. Pour ces directions, le vent a pu s'équilibrer avec les états de surface de la parcelle cultivée sur une distance de minimum 180 m (« fetch »).

La figure 37 semble aussi indiquer l'existence d'une légère saisonnalité de la vitesse seuil de saltation. La vitesse seuil de saltation semble maximale vers le début du mois d'Avril 2009, avec des valeurs de l'ordre de 6.5 à 7.5 m/s est observé. Ensuite, la vitesse seuil de saltation commence à chuter progressivement pour atteindre des valeurs minimales entre fin Aout et Octobre 2009, de l'ordre de 5.5 à 6.5 m/s.

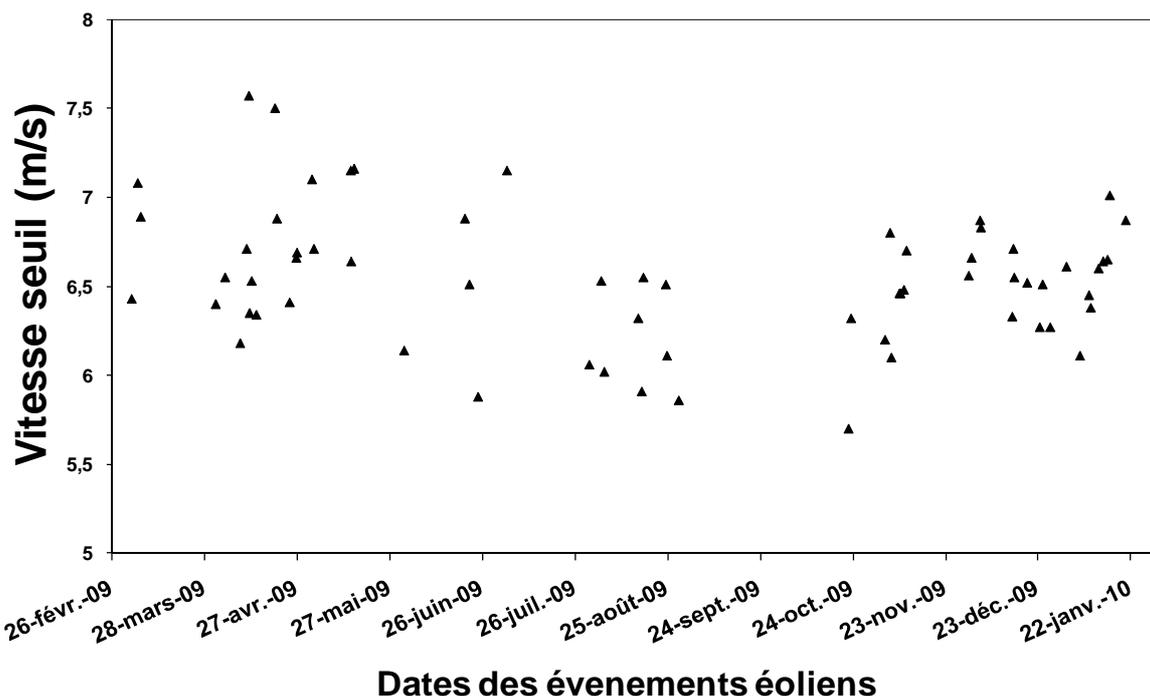


Figure 37. Dynamique de la vitesse seuil d'érosion (m/s) enregistrées entre Mars 2009 et Février 2010 pour les événements dont la direction est comprise entre 225° (SW) et 315° (NW).

2.2.8. Caractéristiques des périodes d'érosion éolienne

Pendant toute la période de mesures, les capteurs BSNE ont été vidés 22 fois. Les sédiments collectés à chaque vidange correspondent à un cumul de sédiments captés lors d'événements qui se sont succédé entre deux vidanges.

A partir des enregistrements météorologiques pour un pas de 1 mn, nous avons pu relever 206 événements d'érosion qui se sont produits entre le 04 Mars 2009 et le 08 Février 2010 (Tableau 6). Après la date du 08 Février 2010, un dysfonctionnement du saltiphone n'a plus permis d'identifier individuellement les événements érosifs. Pour cette raison, nos résultats sont présentés en deux temps : mesures pendant la période de fonctionnement du saltiphone et mesures sans saltiphone (Tableaux 6 et 7, respectivement).

2.2.8.1. Mesures pendant la période de fonctionnement du saltiphone

(Du 04 Mars 2009 au 08 Février 2010)

Pendant cette période, les précipitations sont très irrégulières (Tableau 6), la période la plus humide est celle du 30 Décembre 2009 au 08 Février 2010 où un cumul supérieur à 50 mm de pluie est enregistré. Par ailleurs, les périodes les plus sèches sont celles allant du 19 Juillet au 10 Aout 2009 et celles allant du 19 Novembre au 23 Décembre 2009 où seuls 2 mm de pluie sont enregistrés respectivement pour chaque période.

Sur un total de 341 jours, sont observés un cumul de 18 jours et 19 heures de saltation, répartis sur 206 événements (Tableau 6). La saltation pendant la pluie par rapport à la saltation totale présente des taux très variables (Tableau 6). Les valeurs fluctuent entre des taux $< 1\%$ et vont jusqu'à 49% . Les plus faibles taux de saltation pendant la pluie ($< 1\%$) sont observés au printemps durant les périodes allant du 16 au 28 Avril 2009 et celle allant du 29 Avril 2009 au 17 Mai 2009. Le taux le plus fort de saltation pendant la pluie (49%) est observé en hiver durant la période allant du 30 Décembre 2009 au 08 Février 2010.

Les valeurs de la vitesse moyenne varient entre $6,2\text{ m/s}$ et $7,8\text{ m/s}$ et fluctuent entre $11,4\text{ m/s}$ et $17,7\text{ m/s}$ pour les vitesses maximales. Le maximum de la vitesse du vent est observé durant la période du 04 Mars au 09 Avril 2009 avec $17,7\text{ m/s}$.

La direction moyenne vectorielle du vent érosif est typiquement du Nord Ouest, hormis pour la période du 11 au 19 Aout 2009 et celle du 23 Décembre au 29 Décembre 2009 où le vent érosif présente une moyenne vectorielle dans une direction Ouest. Dans le Tableau 6 pour le calcul de la direction moyenne par période ($\overline{Dir}_{\text{periode}}$), ont été pris en considération uniquement les événements érosifs dont les moyennes vectorielles sont de Ouest à Nord en référence à la Figure 10.

Tableau 6. Caractéristiques des périodes de l'érosion éolienne (mesures effectués avec enregistrements de la saltation)

Nb_e= Nombre d'évènements ; Dt_s=Durée totale de la saltation ; D_{tot}= Durée totale des événements érosifs ; V_s= Vitesse du vent seuil de saltation ; V_{moy}= Vitesse moyenne du vent durant les événements érosifs ; V_{max}= Vitesse maximale du vent durant les événements érosifs ; P= Pluie cumulée durant les événements érosifs ; S_{pluie}= Saltation mesurée durant la pluie ; S_{tot}= Saltation mesurée durant les événements érosifs.

Période (Début à fin)	Nb _e	Dt _s (min)	D _s /D _{tot}	V _s (m/s)	V _{moy} (m/s)	V _{max} (m/s)	P (mm)	S _p /S _{tot}
Du 04/03/2009 au 09/04/2009	19	3478	53	6.5	7.3	17.7	4.0	20.78
Du 10/04/2009 au 16/04/2009	09	1774	70	6.2	6.9	13.3	2.4	1.20
Du 16/04/2009 au 28/04/2009	20	2844	64	6.6	6.5	13.0	5.8	0.18
Du 29/04/2009 au 17/05/2009	12	1913	71	6.4	6.4	11.4	2.6	0.14
Du 18/05/2009 au 28/06/2009 ^(*)	/	/	/	5.6	5.8	13.5	/	/
Du 29/06/2009 au 18/07/2009	20	1082	31	6.2	6.7	13.8	1.2	10.52
Du 19/07/2009 au 10/08/2009	15	828	35	5.8	6.2	14.1	0.4	14.93
Du 11/08/2009 au 19/08/2009	13	2600	66	5.7	7.0	14.8	2.2	13.47
Du 19/08/2009 au 18/11/2009	54	4110	60	6.0	7.0	11.9	19.8	1.2
Du 19/11/2009 au 23/12/2009	23	2703	68	6.5	6.8	13.2	4.0	0.28
Du 23/12/2009 au 30/12/2009	03	1248	80	6.5	7.8	13.5	0.4	0.95
Du 31/12/2009 au 08/02/2010	18	4468	71	6.4	7.1	16	33.0	48.57

(*) = Panne de la station météo.

2.2.8.2. Mesures sans enregistrements de saltation

(22 Février 2010 au 14 Mai 2011)

Pour les périodes allant du 22 Février 2010 au 15 Mai 2011 (Tableau 7), les mesures sont effectuées sans enregistrements de saltation. Les vitesses moyennes du vent varient entre 5,3 m/s et 6,8 m/s. La plus forte vitesse moyenne du vent 6,8 m/s est observée entre le 30 Avril 2011 et 14 Mai 2011. Les vitesses maximales du vent sont variables entre 11,1 m/s et 13,4 m/s. Les plus grandes valeurs des maxima des vitesses du vent sont observées durant la période du 19 Juillet au 05 Aout 2010 et celle allant du 05 Septembre au 02 Octobre 2010 avec des valeurs qui dépassent 13 m/s. De façon globale aussi bien pour la vitesse maximale du vent que pour la vitesse moyenne du vent (Tableau 7), les valeurs durant 2010 et 2011 sont inférieures à celles enregistrées en 2009.

Tableau 7. Caractéristiques des périodes de mesures

(Mesures effectuées sans enregistrements de la saltation)

V_{\max} = Vitesse maximale du vent pendant la période ; V_{moy} = vitesse moyenne du vent pendant la période; P= Pluie ; (*) = Panne de la station météo.

Période (Date début à date fin)	V_{moy} (m/s)	V_{max} (m/s)	P (mm)
Du 08/02/2010 au 21/02/2010	/	/	/
Du 22/02/2010 au 14/04/2010	5.8	11.8	3.2
Du 15/04/2010 au 13/05/2010	5.3	11.1	4.4
Du 14/05/2010 au 12/06/2010	5.7	12.1	5.8
Du 13/06/2010 au 18/06/2010	6.1	12.4	0.0
Du 19/06/2010 au 18/07/2010	5.1	12.38	11
Du 19/07/2010 au 05/08/2010	5.8	13.2	2.4
Du 06/08/2010 au 04/09/2010	4.1	13.18	18.6
Du 05/09/2010 au 02/10/2010	6.1	13.3	4.0
Du 03/10/2010 au 16/10/2010	6.3	11.9	5.6
Du 17/10/2010 au 28/04/2011 (*)	/	/	/
Du 30/04/2011 au 14/05/2011	6.8	13.4	0.0

2.3. Bilans de masse

2.3.1. Mesures avec enregistrements de saltation

(Du 04 Mars 2009 au 08 Février 2010)

Les bilans de masse mesurés sont en majorité négatifs, excepté durant les périodes du 11 au 19 Aout 2009 et du 23 au 29 Décembre 2009, où les mesures donnent des bilans positifs (Tableau 8). Les valeurs des bilans de masse varient entre -91 t/ha et + 5,7t/ha selon la

période. Les plus importantes pertes en terres sont provoquées par les événements qui se sont produits au printemps ; du 16 au 28 Avril 2009 un bilan de masse de -91 t/ha est mesuré. Les dépôts de sédiments sur la parcelle sont relativement moins importants que les pertes observées. Durant les périodes du 11 au 19 Aout 2009 et du 23 au 29 Décembre 2009, respectivement des dépôts de +2.0 t/ha et +5,7 t/ha de sédiments sont mesurés sur la parcelle. Pendant la période globale de mesure, les dépôts cumulés de sédiments sur la parcelle sont très nettement inférieurs au cumul des pertes mesurées. Toutefois un effet direction semble affecter le bilan de masse. Les bilans de masse négatifs sont mesurés pour des directions de vent moyennes vectorielles comprises entre le Nord Nord-Ouest (337°) et l'Ouest Nord-Ouest (293°), alors que les bilans de masse positifs sont mesurés dans des directions de vent moyennes vectorielles Ouest Sud-Ouest (247°).

2.3.2. Relation entre les bilans de masse et les directions moyennes vectorielles du vent

Vu la faible variabilité temporelle de la vitesse seuil de saltation, nous avons souhaité évaluer si cette vitesse seuil pouvait être utilisée pour identifier les périodes de saltation et, par extension, la direction du vent pendant ces périodes. La relation entre les directions moyennes vectorielles du vent pendant la saltation et les directions moyennes vectorielles du vent lorsque la vitesse du vent est supérieure au seuil de saltation, est sensiblement linéaire (Figure 38). La direction moyenne du vent pendant la saltation est fortement corrélée à la direction moyenne du vent quand la vitesse du vent dépasse le seuil de saltation ($R^2 = 0.96$). Aussi toutes les valeurs des vitesses mesurées, sont observées dans des directions moyennes vectorielles oscillant dans un intervalle d'Ouest à Nord.

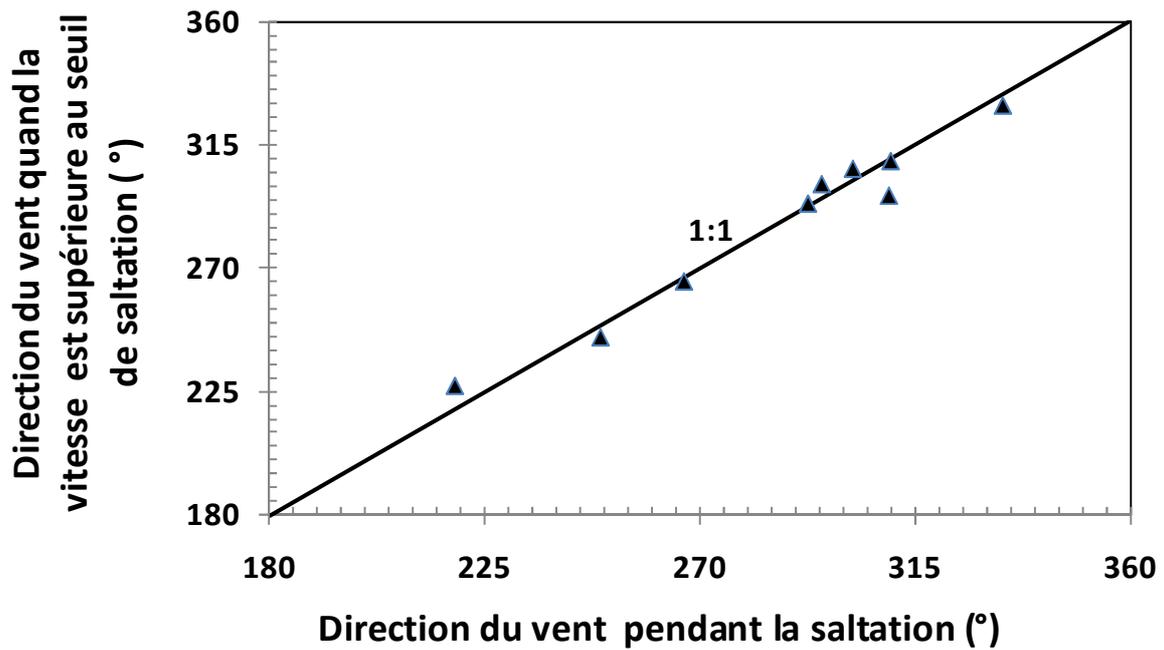


Figure 38. Relation entre la direction moyenne du vent pendant la saltation et la direction du vent pour la vitesse supérieure au seuil de la saltation (du 04 Mars 2009 au 08 Février 2010).

La relation entre les bilans de masse mesurés de Mars 2009 au 08 Février 2010 et les bilans de estimés pour les directions du vent quand la vitesse est supérieure au seuil de saltation (Figure 39) est linéaire. Le bilan de masse mesuré peut expliquer de façon très satisfaisante le bilan de estimé pour la direction du vent quand la vitesse est supérieure au seuil de saltation. Les deux paramètres sont fortement corrélés ($R^2=0,99$).

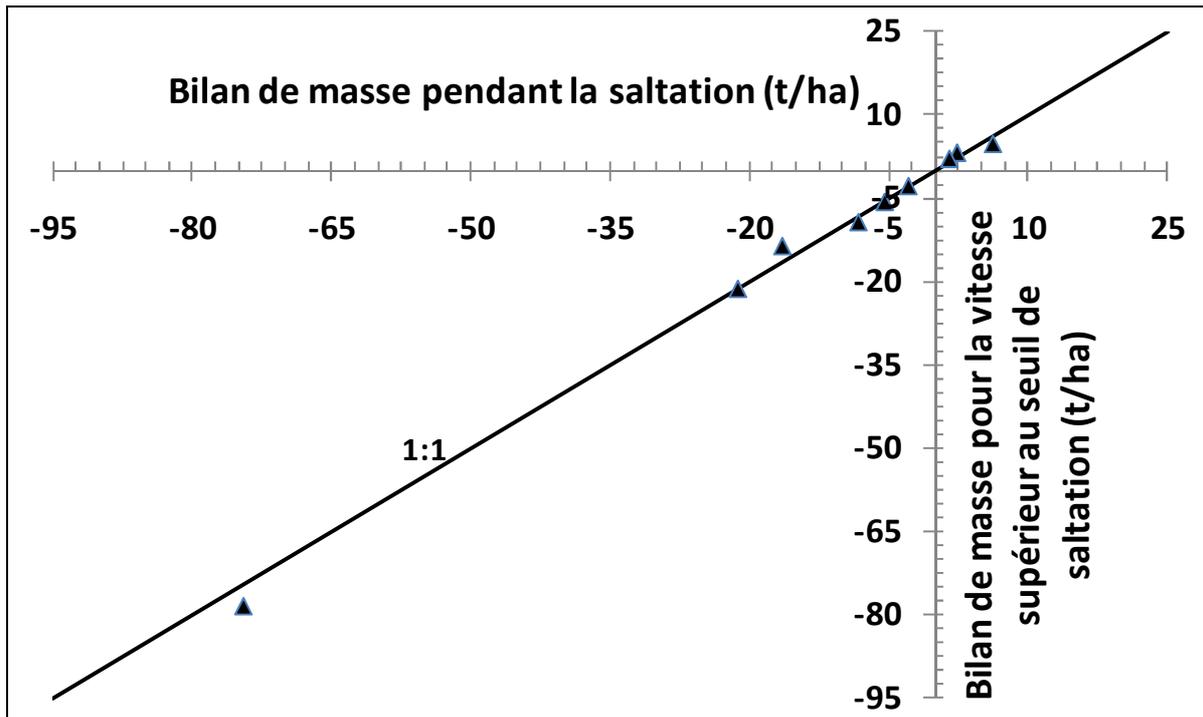


Figure 39. Relation entre le bilan de masse durant la saltation et le bilan de masse pour la vitesse supérieure au seuil de la saltation (du 04 Mars 2009 au 08 Février 2010).

2.3.3. Mesures sans enregistrement de saltation

(22 Février 2010 jusqu'à 14 Mai 2011)

Pendant la période de dysfonctionnement du saltiphone, il n'a pas été possible de déterminer la direction moyenne vectorielle pendant les périodes de saltation. La méthode présentée ci-dessus est cependant applicable. Pour des mesures effectuées sans mesures de saltation (Du 22 Février 2010 au 14 Mai 2011). Dans le périmètre de Mokrane pour une période considérée peut être déterminé de façon satisfaisante par le bilan de masse minimum ou maximum de la même période de mesures.

Tableau 8. Directions du vent et bilans de masse durant les événements érosifs

Dir_s = Direction moyenne du vent pendant la saltation ; $Dir V > V_s$ = Direction du vent pour la vitesse supérieure au seuil de saltation ; d.m = absence de mesures

Période avec enregistrements de saltation			Période sans enregistrements de saltation			
Date du... au	Dir_s (°)	$Dir V > V_s$ (°)	Bilan de masse (t/ha)	Date du... au	$Dir V > V_s$ (°)	Bilan de masse (t/ha)
Du 04/03/2009 au 09/04/2009	309	/	d.m	Du 08/02/2010 au 21/02/2010 (*)	/	/
Du 10/04/2009 au 16/04/2009	296	301	-8.2	Du 22/02/2010 au 14/04/2010	290	-4.0
Du 16/04/2009 au 28/04/2009	302	306	-74.5	Du 15/04/2010 au 13/05/2010	305	+0.2
Du 29/04/2009 au 17/05/2009	333	329	-5.4	Du 14/05/2010 au 12/06/2010	261	-10.8
Du 18/05/2009 au 28/06/2009(*)	/	/	/	Du 13/06/2010 au 18/06/2010	194	+12.9
Du 29/06/2009 au 18/07/2009	310	309	-2.8	Du 19/06/2010 au 18/07/2010	347	d.m
Du 19/07/2009 au 10/08/2009	249	244	+2.4	Du 19/07/2010 au 05/08/2010	300	-3.0
Du 11/08/2009 au 19/08/2009	219	226	+6.2	Du 06/08/2010 au 04/09/2010	314	d.m
Du 19/08/2009 au 18/11/2009	309	296	-16.4	Du 05/09/2010 au 02/10/2010	293	-6.0
Du 19/11/2009 au 23/12/2009	293	293	-21.2	Du 03/10/2010 au 16/10/2010	247	+3.2
Du 23/12/2009 au 30/12/2009	267	265	+1.6	Du 17/10/2010 au 28/04/2011 (*)	/	/
Du 31/12/2009 au 08/02/2010	297	/	d.m	Du 30/04/2011 au 14/05/2011	275	-2.8

(*) = Panne de la station météo.

2.3.3.4. Effet de la direction du vent sur le bilan de masse de la parcelle

Les bilans de masse semblent être affectés par la direction du vent. Ils ont tendance à être négatif (érosion de la parcelle) pour les vents NW, et positif (dépôt sur la parcelle) pour les vents de direction SW.

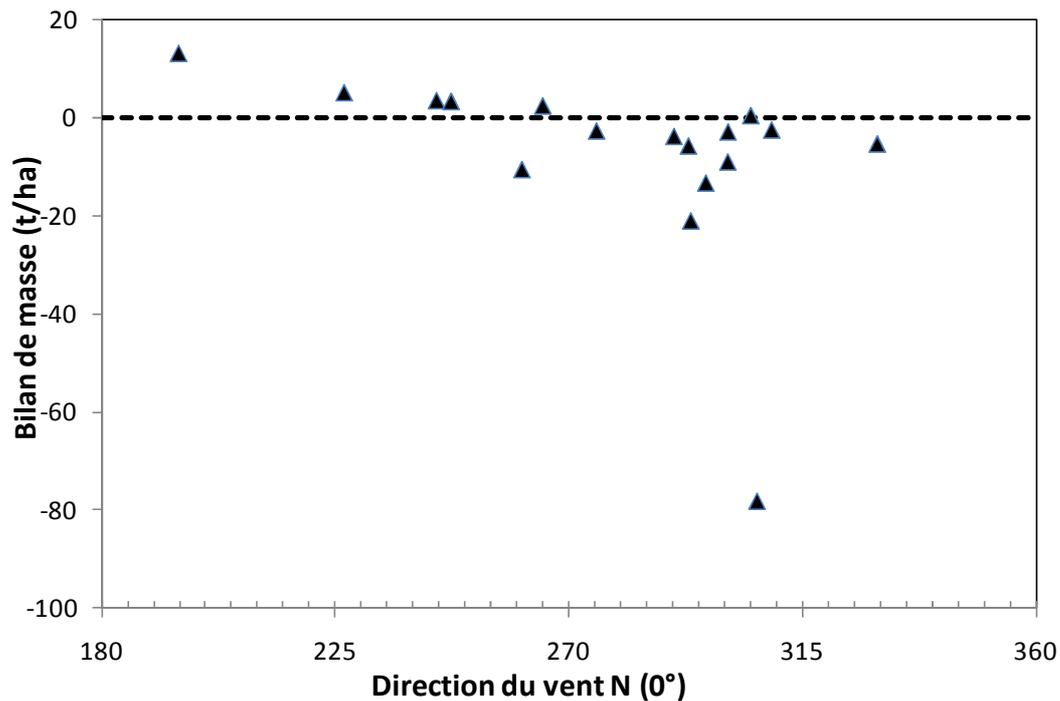


Figure 40. Effet de la direction moyenne du vent sur le bilan de masse de la parcelle expérimentale.

3. Discussions

3.1. Saltation

A 250 km au Nord Est de la région de Laghouat (Guettouche et Guendouz, 2007) indiquent que la durée moyenne des vents de sable est de 50 heures par an. Sur un total de 341 jours, nous observons à Mokrane, 18 jours et 19 heures de Saltation. Taibi (1997) a montré que Laghouat se situait dans une zone à fort transit éolien. La durée moyenne annuelle de vent de sable calculée par Dubief (1952) pour Laghouat est de 6.7 jours entre 1925 et 1939. La durée que nous avons observée à Mokrane, est égale deux fois et demie celle signalée par Dubief (1952). Des enregistrements de saltation en continu et sur plusieurs années seront toutefois nécessaires pour évaluer si cette augmentation résulte d'une variabilité à court terme ou reflète un réel changement climatique.

Environ 2/3 des événements érosifs à Mokrane présentent des durées supérieures à celles observées dans d'autres études ailleurs dans le monde (e.g ; Stout, 1990 ; Michels *et al.*, 1995 ; Sterk et Spaan, 1997 ; Biielders *et al.* ,2002 ; Hupy, 2004 ; Ikazaki *et al.*, 2012). La durée de la saltation par rapport à la durée totale des événements érosifs observées à Mokrane présente des taux qui sont nettement supérieurs à ceux observés dans d'autres études 49 % (Leenders *et al.*, 2005), <1% (Stout, 2003) et variables entre < 1 % et 26 % (Stout et Zobeck, 1997). Les chiffres que nous observons sont indicateurs de l'existence d'une activité éolienne intense dans la région de Laghouat.

Les durées de la saltation sont variables, et ne sont pas en relation avec le nombre d'événements qui se sont produits durant les périodes considérées (Tableau 6). Par rapport aux durées totales des événements, les durées de saltation les plus faibles sont enregistrés durant les périodes tempérées de l'année entre Mai et Aout 2009. Les valeurs les plus élevées des taux de saltation sont observées en Mars et Avril 2009 et entre Décembre 2009 et Février 2010. Les forts taux de saltation que nous avons observés ont eu lieu entre Mars et Avril 2009 et Décembre 2010. Nos observations sont en accord avec les travaux de Dubief (1952), qui rapporte qu'à Laghouat, c'est la circulation d'hiver et de printemps qui semble la plus efficace pour les transports de sable (Décembre à Mai).

3.2. Vitesse seuil de l'érosion éolienne

Les valeurs de la vitesse seuil de l'érosion dépendent des méthodes utilisées pour leurs estimations (Barchyn et Hugenholtz, 2011). Nous calculons des valeurs qui varient de 5.75 m/s à 7.55 m/s. Nos valeurs sont dans les intervalles de celles estimées lors d'autres études 7.5 à 8.5 m. s⁻¹, à 2 m de hauteur (Biielders *et al.*, 2004) ; 6 à 7 m. s⁻¹ à 10 m (Ozer *et al.*, 2005) ; 6.07 m. s⁻¹ à 2 m (Tidjani *et al.*, 2009) ; 6.4 m. s⁻¹ à 3 m (Sharrat et Feng, 2009) ; 5,8 m/s et 7,3 m/s à 2,5 m (Touré *et al.*, 2011).

Bien que faible, la saisonnalité de la vitesse seuil de l'érosion éolienne à Mokrane (Figure 5) peut être expliquée par les variations des paramètres du sol et ceux du climat (Cooke *et al.* ,1993 ; Stout et Zobeck, 1997 ; Stout, 2004, 2010 ; Zobeck et Scott Van Pelt, 2006 ; De oro et Bushiazzo, 2009 ; Sharratt et Feng ,2009). Si nous considérons le développement de la couverture végétale sur la parcelle, on observe que le développement de la culture de l'orge et des adventices est maximal en avril et provoquerait une augmentation de la vitesse seuil d'érosion. Pendant la période fin printemps (Mai 2009) et l'été, les fortes chaleurs assèchent

les plantes, ce qui serait à l'origine d'une diminution des valeurs observées de la vitesse seuil de l'érosion. En automne au mois d'Octobre 2009, l'installation de la nouvelle culture de l'orge avec les pluies qui ont marqué le mois de Septembre 2009 provoqueraient un redéveloppement des plantes et une augmentation de la couverture végétale sur la parcelle et dont la conséquence est un accroissement de la vitesse seuil de l'érosion qu'on observe après Octobre 2009.

3.3. Vitesse moyenne et vitesse maximale du vent pendant la saltation à 3,6 m

Pendant la saltation, les valeurs de la vitesse moyenne varient entre 6,2 m/s et 7,8 m/s et fluctuent entre 11,4 m/s et 17,7 m/s pour les vitesses maximales. Les vitesses moyennes du vent pendant la saltation que nous observons sont légèrement inférieures à celles observées durant des événements érosifs éoliens en Afrique subsaharienne (Sterk et Spaan, 1997 ; Biolders *et al.*, 2002 ; Rajot *et al.*, 2003 ; Tidjani, 2008). Les vitesses maximales enregistrées à Mokrane sont dans des intervalles similaires à celles observés dans d'autres études (Michels *et al.*, 1995; Ikazaki *et al.*, 2012).

Au sein d'une même période, la vitesse maximale du vent est nettement supérieure au seuil de saltation (Tableau 6). Ces valeurs sont preuve d'une activité éolienne potentielle dans la zone de Mokrane à Laghouat. La vitesse maximale reflète l'importance de certaines rafales de vent dans la zone.

3.4. Direction des vents érosifs

Les études de la climatologie des transports éoliens dans la steppe algérienne ont montré que dans la steppe centrale, les vents de sable sont de direction dominante Nord-Ouest (Taibi, 1997). Pour la steppe ouest les vents de sable oscillent entre des directions Ouest et Nord-Ouest (Bensaid, 2006). Pour la steppe Est, les vents érosifs sont de directions dominantes saisonnières Nord-Ouest ou Sud-Ouest (Guettouche et Guendouz, 2007). Dans des études de l'érosion éolienne au Sahel (Sterk, 1997 ; Visser *et al.*, 2004 ; Sow *et al.*, 2009) ont rapporté que la direction du vent peut être variable pendant les tempêtes ou durant les événements érosifs. Dans le périmètre agricole de Mokrane, plus de 98 % de la saltation est cependant observées dans des directions du vent oscillant dans un intervalle Ouest à Nord-Ouest avec une dominance Nord-Ouest (Figure 36). La direction moyenne du vent érosif est, pour la majorité des périodes, Nord-Ouest (Tableau 2). Nos observations sont en accord avec

Dubief (1952) et Taibi (1997) qui signalent que les déplacements de sable à Laghouat ont lieu dans une direction dominante Nord-Ouest. Durant les courtes périodes allant respectivement du 11 au 19 Aout 2009 et du 23 au 29 Décembre 2009, les vents érosifs sont de direction Ouest. Ces deux périodes sont succédées de périodes relativement pluvieuses (Figure 32 ; Tableau 6) : 93 mm en Septembre 2009 et plus de 50 mm de pluie en Janvier 2010. La même observation est notée après la période du 28 Avril 2011 au 06 Juin 2011. Il est probable que la direction moyenne du vent érosif soit Ouest, ceci correspondant à une annonce de l'avènement de pluies. Des observations plus étalées dans le temps permettront de mieux confirmer cet effet de la direction du vent sur la pluie.

3.5. Bilans de masse

3.5.1. Mesures effectuées avec enregistrements de la saltation

(Du 04 Mars 2010 au 08 Février 2011)

Les bilans de masse (Tableau 8) ont été calculés durant des périodes pouvant inclure des moments pluvieux. Mais si on considère chacune des périodes séparément, seule la période du 30 Décembre 2009 au 08 Février 2010 est marquée par un grand cumul de pluie et présente un taux élevé de saltation durant de pluie (49 %). Le bilan de masse de cette période est donc exclu des analyses présentées dans ce document. Durant les périodes du 19 Juillet 2009 au 10 Aout 2009 et du 11 Aout 2009 au 19 Aout 2009, respectivement 0.4 mm et 2.2 mm de pluies cumulées sont enregistrées. La saltation sous la pluie par rapport à la saltation totale présente des taux excédant 10 % pour ces deux périodes. Les enregistrements de la station météo pour un pas de 1 mn ont permis de déceler que les minutes qui séparent deux basculements de l'auget du pluviomètre sont assez espacés dans le temps. Par ailleurs, ces deux périodes ont lieu durant les mois les plus chauds de l'année (Figure 33). Le sol sableux (Tableau 5) de la parcelle serait assez chaud pour que l'eau ne tienne pas de manière à pouvoir affecter nos mesures sur les bilans de masse. Seuls les premiers millimètres du sol sont affectés par l'érosion éolienne, pour des sols sableux, cette couche se dessèche très rapidement entre deux événements pluvieux de telle sorte que la surface du sol est généralement sèche avant le passage de l'événement érosif suivant (Biielders *et al.*, 2004). Pour les autres périodes (Tableau 6) les taux de la saltation pendant la pluie sont < 5 %, jugées trop faible pour affecter nos mesures sur les bilans de masse.

Les bilans de masse et leur signification sont directement liés aux échelles considérées, aussi

les résultats de mesures d'érosion à l'échelle de la parcelle expérimentale sont en fait difficilement comparables d'une étude à l'autre du fait des différentes techniques de mesure employées (Biielders *et al.*, 2004). Les valeurs des bilans de masse mesurés à Mokrane à Laghouat sont très élevées en comparaison avec celles obtenues dans d'autres études (Sterk *et al.*, 1997; Biielders *et al.*, 2000 ; 2001 ; Tidjani, 2008). Les instruments, les techniques de mesures ainsi que les méthodes de calculs utilisées pour l'estimation des paramètres entrées dans le calcul des bilans de masse sont variables et sont différentes d'une étude à une autre, peuvent partiellement expliquer les écarts observés dans les valeurs. Au Niger, (Tidjani *et al.*, 2011) ont trouvé que l'incertitude relative sur le bilan de masse varie de 85% à 1000%. Les valeurs des bilans de masse que nous mesurons, ne sont pas en relation avec les durées de la saltation de leurs périodes relatives. De même, ils ne sont pas liés aux nombre d'événements érosifs qui se sont produits durant les périodes (Tableau 6). La force du vent est variable d'une période à l'autre. Les bilans les plus élevés sont mesurés durant les périodes du 16 au 28 Avril 2009 (équivalent 1 mois avec 32 événements) où environ 91 t/ha de terre sont perdues, soit plus de 50 % du total des pertes de terre enregistrées pendant la totalité des périodes de mesure.

Les bilans de masse positifs qui ont marqué la période du 11 au 19 Aout 2009 et celle du 23 au 29 Décembre 2009 (Tableau 8) correspondent à des dépôts, ce qui nécessite une source de sédiments. Ces sources de sédiments peuvent être les remblais retirés de la parcelle avoisinante et déposés sur ses limites. Cela peut être aussi dû à des parcelles avoisinantes nouvellement défrichées dans le périmètre, dont les particules de sol sont plus érodibles que celles de notre parcelle.

Si on considère la totalité des périodes, les pertes en terre sont nettement supérieures aux dépôts sur la parcelle expérimentale. Le champ cultivé en pluvial à l'orge a été sujet à l'érosion éolienne durant la période allant de Mars 2009 à Février 2010. Les pertes en terres mesurées sont la conséquence du défrichement du sol et sa mise en culture en pluvial du champ expérimental. Les bilans de masse mesurés (Tableau 8) sont remarquablement élevés et sous-entendent de très forts déplacements de sédiments dans la zone de Mokrane. Il serait très intéressant de voir qu'elles en sont les conséquences par rapport aux nutriments qui sont perdus avec les sédiments.

3.5.2. Mesures effectuées sans enregistrements de la saltation

(Du 22 Février 2010 au 14 Mai 2011)

Durant cette période, nous n'avons pas pu avoir les enregistrements de la saltation. En conséquence aussi bien la détermination de la direction moyenne du vent, que l'estimation d'un bilan de masse mesuré pour les périodes considérées sont devenues délicates.

La direction du vent pendant la saltation peut être estimée de façon tout à fait satisfaisante par la direction du vent quand la vitesse dépasse le seuil de saltation, et le bilan de masse par le bilan de masse de la direction du vent quand la vitesse dépasse le seuil de saltation (Figures 38 et 39). En conséquence à ces relations (Figures 38 et 39), le bilan de masse que nous mesurons sans enregistrement de saltation peut être estimé par le bilan de masse quand la vitesse dépasse le seuil de saltation.

3.5.3. Effet de la direction du vent sur le bilan de masse à l'échelle de la parcelle expérimentale

Comme le montre la Figure 40, les bilans de masse sont affectés par la direction du vent. Ils ont tendance à être négatif (érosion) pour les vents NW, et positif (dépôt) pour les vents de SW. L'érosion lors des vents NW indique clairement que l'érodabilité du champ cultivé était supérieure à celui du parcours steppique. Les vents SW, traversent la moitié sud du champ expérimentale avant d'entrer dans la partie du champ qui a été suivi d'érosion éolienne. Il semble donc que le champ sud avait une érodabilité supérieure à la moitié nord, tels que les sédiments érodés dans la moitié sud seraient redéposés dans la moitié nord. Ce qui est clairement un «artefact» en raison de la configuration du terrain.

4. Conclusions

Les politiques agricoles en Algérie n'épargnent pas les terres des parcours steppiques d'une mise en culture en pluviale. La steppe algérienne est localisée dans l'étage bioclimatique aride ou semi aride caractérisé par une faible pluviométrie qui va l'encontre du développement des cultures et des sols légers et pauvres qui pourraient éventuellement donner lieu à une grave érosion éolienne.

L'impact de la conversion des terres de la steppe en terres cultivées sur les pertes de sol par érosion éolienne a cependant donné à Laghouat, pour une parcelle de 1.35 ha des résultats très

remarquables. Les vents érosifs provenaient principalement de la direction NW, avec une contribution secondaire des vents provenant de la direction SW. La vitesse seuil de saltation variait entre 6 et 7 m.s-1 et a présenté une légère saisonnalité, avec des valeurs maximales au début du printemps et les valeurs minimales à la fin de l'été. Cette faible saisonnalité a été attribuée au faible développement de la culture d'orge (*Hordeum vulgare*). Les vitesses maximales du vent n'étaient pas particulièrement élevées, mais de grands taux d'érosion ont néanmoins été observés. Cela peut être attribué à la fréquence élevée des vitesses de vent dépassant le seuil de saltation. La nette perte de sol observée est de l'ordre de 128,5 t ha-1 sur une période de 25 mois a entraîné un départ de 155 t ha-1 de sol et 26,5 t ha-1 de dépôt sur le sol. Cela correspond à un taux d'érosion moyen de 74,4 t ha-1 an⁻¹.

Le dépôt a été associé à des vents de SW et pourrait être considéré comme un artefact expérimental qui souligne une fois de plus que les bilans de masse de l'érosion éolienne ne peuvent pas être correctement interprétés sans tenir compte de l'environnement des domaines étudiés.

Dans tous les cas, les pertes de sol élevées révèlent clairement que les cultures pluviales ne conviennent pas dans les zones semi-arides de Laghouat car elles sont à l'origine des taux d'érosion cinq fois supérieurs aux plus hautes valeurs de perte de sol tolérables qui existent. Par conséquent, les bilans de masse rapportés ici pour vents NW sont représentatifs de ce qui se passerait si un parcours steppique devait être converti en terre cultivée.

Chapitre 4

Eléments de la surface du sol et productivité pastorale dans le parcours de Mokrane à Laghouat

1. Introduction

Les steppes en Algérie présentent, du point de vue biogéographique et écologique, une zone de transition entre le Sahara et la région méditerranéenne ; leur composition floristique est variée (Le Houérou, 1995). Elles constituent l'espace de nomadisme et des grandes transhumances, leur équilibre a été pour longtemps assuré par une harmonie très rigide entre l'homme et le milieu dans lequel il vit. Les pratiques humaines ancestrales permettaient la régénération des ressources naturelles steppiques et donc la durabilité de leur exploitation (Boukhobza, 1982 ; Bédrani, 1995). La croissance démographique combinée au manque de création d'emplois ont provoqué l'augmentation de la pression sur les ressources terre et cheptel, obligée de se créer un revenu pour survivre une grande partie de la force de travail sur les espaces steppiques se tourne vers les activités pour lesquelles elle a quelques compétences et/ou les barrières d'entrées n'existent pas : élever quelques têtes de brebis et de chèvres et défricher un morceau de steppe (Bédrani, 1994). Ce territoire a subi donc des modifications profondes, dont la conséquence est une dégradation par érosion hydrique et surtout éolienne de plus en plus importante, et ressentie à tous les niveaux, du territoire steppique (Le Houérou, 1995 ; Labani *et al.*, 2005, Nedjraoui et Bédrani, 2008).

De nombreux facteurs influencent l'ampleur de l'érosion éolienne, l'élévation, la topographie, la couverture végétale, le type de sol, la texture de la surface du sol, et le climat (Lopez et Garcia, 1998). La couverture végétale intervient en faveur de la protection des terres contre l'érosion éolienne par son action de réduire la vitesse du vent à la surface du sol, cela dit que la plupart des sols ont besoin d'une couverture végétale suffisamment dense pour prévenir

l'action destructrice de l'érosion éolienne (Woodruff *et al.*, 1972). La présence de la végétation photosynthétiques et des résidus atténue l'effet du vent, la vitesse seuil de soulèvement des particules s'élève et les sols se dégradent moins (Chepil, 1945 ; Chepil *et al.*, 1955 ; Siddoway *et al.*, 1965 ; Michels, 1995, Lancaster and Baas, 1998 ; Skidmore, 1987 ; Rajot, 2001 ; Bielders *et al.*, 2002, 2004 ; Hupy, 2004 ; Leenders *et al.*, 2007 ; Touré *et al.*, 2011 ; Touré *et al.*, 2013). La végétation provoque aussi l'augmentation de la rugosité du sol et réduit son érosion éolienne (Buschiazzo and Zobeck, 2008 ; Fryrear *et al.*, 1998a, Tidjani, 2008). D'où la considération des paramètres taux de couverture végétale et la taille de la silhouette des plantes dans les équations modèles développées pour l'estimation des pertes en terres (Chepil and Woodruff, 1963 ; Woodruff and Siddoway, 1965 ; Fryrear *et al.*, 1991, Fryrear *et al.*, 1998a, 1999).

Le changement dans le mode de l'utilisation des terres provoque des modifications de leurs états de surfaces et influence les modèles d'écoulement des flux d'air à la surface du sol, et par conséquent les flux de transport de sédiments éoliens en sont affectés (Ravi *et al.*, 2010 ; Li *et al.*, 2007 ; Zhang *et al.*, 2014). Les mesures ont montré que ces flux seraient beaucoup plus fort sur un sol cultivé que sur un sol fixé par de la végétation naturelle, par contre la vitesse seuil de l'érosion est plus faible sur un sol cultivé que sur un sol naturellement végétalisé (Zhang *et al.*, 2014). Egalement le couvert végétale contribue fortement au piégeage des particules érodibles du sol (Leenders, 2006 ; Ikazaki, 2011). Aussi bien que les quantités de sédiments fins et de nutriments piégées par les organes aériens des plantes sont proportionnelles aux taux de couverture du sol par la végétation (Yan *et al.*, 2011). En conséquence la végétation intervient doublement sur le sol (défense contre une dégradation physique et une atténuation de sa dégradation chimique).

La lutte contre la dégradation des terres, pour le maintien de l'équilibre d'un écosystème passe par la compréhension de la structure de la végétation et du fonctionnement des groupements qui maintiennent les matériaux du sol en place (Daget, 1980 ; Aidoud, 1983 ; Aidoud Lounis, 1984 ; OSS, 2004). Cela contribue aussi amplement dans les prévisions de mise en valeur agricole des terres steppiques (Le Houérou, 1995).

La dégradation des parcours dans les régions steppiques est fortement médiatisée en Algérie, elle est surtout vue sous un angle écologique, et se manifeste par une évolution de la végétation s'éloignant d'une forme d'équilibre climacique (OSS, 2004). Cette couverture végétale a intéressé nombreux auteurs (Maire, 1926 ; Kilaian, 1948 ; Quezel et Santa, 1962,

1963; Ozenda, 1983, 2004 ; Djebaili, 1978 ; Pouget, 1980 ; Nedjraoui, 1981 ; Aidoud, 1983 ; Aidoud Lounis, 1984 ; Bouzenoune, 1984 ; Melzi, 1993 ; Kaabache, 1990 ; Djelouli, 1990 ; Hourizi, 1995 ; Boughani, 1995 ; Kadi Hanifi, 1998 ; Roselt & OSS, 2001 ; 2004 ; 2013 ; Slimani *et al.*, 2010, Salmekour *et al.*, 2013). La connaissance des groupements de végétaux et l'état de la surface du sol a constitué un excellent outil d'information sur l'état de santé et la dégradation de cet écosystème (Oussedik *et al.*, 2003 ; OSS, 2004 ; 2008).

Compte tenu de ces éléments la connaissance de l'état de santé de l'écosystème dans la steppe à Laghouat et particulièrement dans la zone de Mokrane facilitera la compréhension de son état de santé et permet de prévoir vis-à-vis de l'exploitation de ses terres. Le lieu est le siège d'une mise en valeur agricole des terres dans le cadre de l'APFA (DPSL, 2010 ; 2012). Les terres sont exploitées par leurs bénéficiaires à la marge d'un déficit d'eau qui permettrait une irrigation suffisante pour le bon développement des cultures (Nos enquêtes). La mise en culture en pluviale après le défrichement d'un sol et son dénudement de sa végétation qui maintenait son équilibre a manifesté un lourd bilan d'érosion (Houyou *et al.*, 2014). Actuellement toute la zone de Mokrane est le siège de défrichements et de mise en culture en pluviale en vue de l'appropriation de morceaux de terres (nos observations) à la suite de l'application de la circulaire interministérielle (108 du 23 Février 2011) portant sur la création de nouvelles exploitations agricoles et d'élevage sur les terres relevant du domaine privé de l'Etat dans les wilayas sahariennes.

L'objectif de ce chapitre est l'étude de l'état de santé du parcours steppique où se trouve la parcelle expérimentale qui a servi à la mesure de l'érosion éolienne. L'état de santé est déterminé par le biais d'analyses de l'état de surface du sol et de la productivité pastorale du lieu. Et de ce fait ce chapitre constitue aussi une contribution à ceux qui l'ont précédé concernant les études de la végétation de l'écosystème steppique de l'Algérie.

2. Matériels et Méthodes

2.1. Le lieu de l'étude et justification du choix

Les critères devant orienter le choix du parcours pour mener l'étude sont les suivants :

-Il doit présenter les caractéristiques non perturbées du parcours que nous avons converti en terre cultivée pour mesurer l'érosion éolienne ;

-Direction des vents dominants ;

Sur la base de ces critères, les éléments de la surface du sol et de la productivité pastorale du parcours vont être effectués à proximité du champ expérimental, sur les parcours situés avec les frontières Nord et Nord Ouest de la parcelle expérimentale (Figure 41).

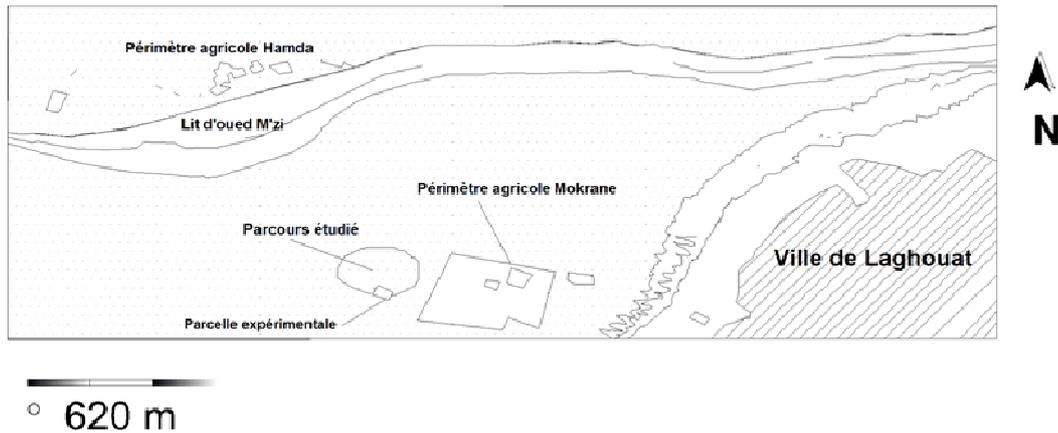


Figure 41. Localisation du parcours étudié dans la zone de Mokrane.

2.2. Le relevé linéaire

Le relevé phytocéologique (relevé linéaire) a été adopté dans cette étude pour l'estimation de la productivité pastorale et l'état du parcours qui nous intéresse. Ce relevé linéaire s'inspire des techniques développées dans les prairies par (Confield et Anderson ,1942) in (Daget et Poissonet, 2010). La méthode est la mieux adaptée pour les formations végétales steppiques, et semble être la plus efficace, car elle est simple, rapide, relativement objective et utilisable dans tous les types de végétation basse, pour mesurer le recouvrement du sol par de la végétation, la phytomasse, la productivité primaire, la valeur pastorale et aussi l'évolution des terrains de parcours (Gounot, 1969 ; Lacoste et Salanon, 1999 ; Le Fl'och, 2008). D'autres part la méthode a été utilisée par nombreux auteurs pour l'étude et la cartographie de la végétation steppique et des éléments de la surface du sol en Algérie (eg ; Aidoud, 1984 ; Kaabache, 1990 ; Le Houérou, 1995 ; Roselt & OSS, 2001 ; 2004 ; 2008 ; Slimani *et al.*, 2010).

Un relevé comporte trois catégories d'informations : (i) Géographiques : date, localité, coordonnées, altitude, pente, exposition (ii) Environnementales : lithologie, drainage,

humidité, humus, sol, et (ii) Spécifiques, ou floristiques : liste des espèces végétales, éventuellement en fonction de la stratification des individus, avec des indications quantitatives d'abondance, de recouvrement, de biomasse ou, simplement qualitatives, de présence (Jager et Looman, 1995). Selon Aidoud (1984), Le relevé phytoécologique est considéré généralement comme un échantillon, il est en réalité un ensemble de mesures, chacune correspondant à une variable.

Afin d'atteindre notre objectif visé (éléments de surfaces du sol) par ce chapitre, le relevé phytoécologique a été adopté, il est considéré comme un échantillon regroupant en fait un ensemble de mesures chacune correspondant à une variable parmi lesquelles :

- la surface du sol comme information environnementale
- la liste des espèces végétales présentes comme information spécifique.

2.3. Méthode d'approche du terrain

Etant donné que nous ne disposons d'aucune donnée initiale sur l'état du lieu nous avons d'abord effectué des visites du parcours entourant le champ expérimental qui a servi à la mesure de l'érosion éolienne. L'intérêt que nous portons à la surface du sol, nous a conduits à identifier dans les lieux deux types d'unités géomorphologiques bien distinctes. La première unité géomorphologique (U1) est représentée par un espace dunaire caractérisé par un sol couvert d'une épaisse couche sableuse (Figure 42 a). La deuxième unité géomorphologique (U2) est un espace inter-dunaire dont l'aspect superficiel du sol présente de l'encroûtement (Figure 42 b).



(a) Espace dunaire (Unité géomorphologique 1)



(b) Espace inter-dunaire (Unité géomorphologique 2)

Figure 42. Représentation des deux unités géomorphologiques étudiées dans le parcours de Mokrane.

2.4. Mode opératoire et emplacement des relevés sur le terrain

Les relevés phytoécologiques ont lieu dans six (6) stations partagées entre les deux types d'unités géomorphologiques identifiées (Tableau 9), chacune des stations présente une superficie d'environ 5 ha.

Le relevé linéaire consiste à recenser les espèces et aussi les éléments de la surface du sol à la verticale de points disposés régulièrement le long d'une ligne à l'aide d'une aiguille. Nous avons veillé à ce que la ligne du relevé doit exister dans l'unité géomorphologique identifiée représentant ainsi un site qui selon (Le Fl'och, 2008) est une surface où les conditions écologiques sont considérées comme étant homogènes et où la végétation est uniforme, nous avons dès lors évité toutes les zones de transitions. La ligne du relevé est constituée d'un ruban d'une longueur de 10 m tendu entre les extrémités de deux piquets auxquels il est attaché. En démarrant à partir de l'une des deux extrémités du ruban, on prend la lecture en faisant tomber une tige métallique de 4 mm de diamètre et de hauteur 1 m verticalement chaque 10 cm tout au long du ruban. On note l'espèce végétale ou l'élément de la surface du sol qui est rencontré au niveau de chaque point de lecture dans une fiche qui porte la date et le numéro de chaque relevé. Dans notre cas les éléments de la surface du sol retenus sont (sable, litière, éléments grossiers et croûte).

Les relevés ont lieu durant la saison du printemps, période que nous avons jugée optimale pour le développement de la végétation steppique. Au total soixante (60) relevés ont été effectués, entre Mars et Mai 2010. Trente (30) relevés ont été réalisés dans la première unité géomorphologique (U1) et trente (30) autres relevés ont été effectués dans la deuxième unité géomorphologique (U2). Dans chacune des stations dix (10) relevés linéaires ont été réalisés.

Tableau 9. Localisation géographique des stations d'étude.

Unité Et station	N	E	Elévation (m)
U1 S01	33° 49' 10,1"	002°48' 21,9"	788
U1 S02	33° 49' 20,5"	002°48' 50,9"	797
U1 S03	33° 46' 44,1"	002°48' 33,1"	803
U2 S01	33° 49' 09,0"	002°48' 23,1"	791
U2 S02	33° 49'15,3"	002°48' 54,9"	797
U2 S03	33° 46' 31,9"	002°48' 24,3"	800

2.5. Analyses des données de terrain

2.5.1. Analyse floristique

2.5.1.1. Identification, classification des espèces végétales

L'identification, et la nomenclature des espèces rencontrées sur le terrain ont été effectuées en nous aidant par les travaux de (Quezel et Santa, 1962 ; Ozenda, 1983 ; 2004 ; Beloued, 2005).

2.5.1.2. La richesse floristique totale du tapis végétal (s)

La richesse totale (S), est le nombre total d'espèces que comporte le peuplement d'une biocénose. Elle représente en définitive un des paramètres fondamentaux caractéristiques d'un peuplement et représente la mesure la plus fréquemment utilisée de sa biodiversité (Ramade, 2001).

Selon le nombre d'espèces végétales présentes dans la biocénose (Daget et Poissonet, 1971) ont définie une échelle de richesse des espaces, qui comporte sept classes et qui a été utilisée dans notre cas.

-  -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.

2.5.1.3. La fréquence spécifique (F_{Si})

Selon Le Fl'och (2008), 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 (F_{Si}) d'une espèce (i) est égale au nombre de points où cette espèce a été observée le long d'une ligne disposée dans la végétation.

La fréquence spécifique est le rapport exprimé en pourcentage du nombre (n_i) de fois où l'espèce (i) a été recensée le long de la ligne au nombre total (N) de points d'échantillonnés.

$$F_{Si}(\%) = \frac{n_i}{N} \times 100 \quad \text{Equation 12}$$

n_i : Abondance de l'espèce i
 N : Nombre totale de points de lecture

2.5.1.4. La contribution spécifique au tapis végétal (C_{Si})

La contribution spécifique (C_{Si}) d'une espèce (i) définit sa participation au tapis végétale. 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 (Daget et Poissonet, 1971 ; Le Fl'och, 2008).

Elle est définie comme le rapport de la fréquence spécifique d'une espèce végétale (i) à la somme des fréquences de toutes les espèces végétales recensées.

$$C_{Si}(\%) = \frac{F_{Si}}{\sum F_{Si}} \times 100 \quad \text{Equation 13}$$

2.5.1.5. Diversité spécifique (H') ou indice de Shannon

L'indice de Shannon représente la quantité d'information apportée par un échantillon sur la structure du peuplement dont provient l'échantillon et sur la façon dont les individus y sont répartis entre diverses espèces (Daget, 1976). 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 communauté présente (Dajoz, 1970 ; Lacoste,

1975). Il se formule comme suit :

$$H' = -\sum P_i \times \log_2 P_i \quad \text{Equation 14}$$

Où :

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

$P_i = n_i / N$, (effectif i / effectif global). Elle rend compte indirectement de la probabilité de la compétition des individus de l'espèce i avec ceux des autres espèces ;

N : Abondance du peuplement (Nombre d'espèces présentes) ;

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 (Dajoz, 1982).

L'indice de Shannon-Weaver (Shannon & Weaver, 1949 in Le Floc'h, 2008) largement utilisé se calcule à partir des données quantitatives ou semi-quantitatives de la végétation (Le Floc'h, 2008).

Cet indice varie toujours de 0 à $\log_2(s)$ dans une fourchette approximative de 0,5 à 5 dans le même sens que la richesse spécifique et en fonction des mêmes paramètres dynamiques environnementaux (Lacoste et Salanon, 2006).

2.5.1.6. Equitabilité (EQ)

L'Equitabilité (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 (Ramade, 2001 ; Dajoz, 2006). C'est le rapport de la diversité d'un peuplement ou d'un échantillon et du nombre N d'espèces présentes dans le lieu.

Pour le calcul de ce paramètre nous avons utilisé la formule (Equation 15) adoptée pour son estimation dans les parcours steppiques algériens (CRBT, 1978 ; Aidoud, 1989 ; Boughani et Hirche, 1991).

$$E_Q = \frac{H'}{\log_2(N)} \quad \text{Equation 15}$$

Où

H' : Diversité spécifique

N : Abondance du peuplement (Nombre d'espèces présentes).

2.5.1.7. Le recouvrement global de la végétation (RG)

Le recouvrement de la végétation est un paramètre quantitatif qui permet directement de distinguer les pâturages selon leur état actuel de dégradation (Daget et Poissonet, 2010). C'est le rapport en pourcentage entre le nombre de point de végétation (n) et le nombre total de points de contacts ou de lectures (N). Il exprime aussi la fréquence globale de la végétation, et il définit théoriquement le pourcentage de la surface du sol (Equation 16) qui serait recouvert par les végétaux (Gounot, 1969 ; Le Fl'och, 2008).

$$RG (\%) = \frac{n}{N} \times 100 \quad \text{Equation 16}$$

2.5.1.8. La productivité pastorale et valeur du parcours

Les parcours jouent avec les sous-produits de la céréaliculture un rôle important dans l'alimentation du cheptel (Abdelguerfi et Laouar, 2004). Le pouvoir nutritionnel des pâturages fait intervenir un ensemble de paramètres liés à la phytomasse présente et à l'animal au quel elle est offerte (Daget et Poissonet, 2010).

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 ($UF \cdot ha^{-1} \cdot t^{-1}$). Pour son calcul nous avons adopté la formule (Equation.17), développée et utilisée dans de nombreux travaux, portant sur la steppe algérienne (CRBT, 1978 ; Aidoud, 1989 ; Boughani et Hirche, 1991 ; OSS, 2004 ; 2008). Elle est représentée par la régression entre la valeur pastorale et la productivité fourragère d'un parcours.

$$P_r = 6,74V_p + 14,77 \quad \text{Equation 17}$$

Ou :

P_r : 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 (Daget, 1974). D'après Aidoud (1989), 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 présentent par les indices correspondants à chacune d'entre elles et en additionnant les valeurs obtenues (Daget et Poissonet, 1971, 2010 ; Hirche *et al.*, 1999). Pour l'évaluation de la valeur pastorale nous avons utilisé (Equation 18) que Hirche et al (1999) 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 ,1974).

$$V_p = 0,1 \times R_G \times \sum C_{si} \times I_{si} \quad \text{Equation 18}$$

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 Aidoud (1983) 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 (Annexe I, Tableaux 1 et 2).

2.5.1.9. 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 19.

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

Equation 19

C : la charge animale (ha)

Besoin d'un mouton : Sont de l'ordre de (400 UF/an) moyenne estimée pour un mouton dans la steppe algérienne (Aidoud, 1989). Valeur utilisée pour l'estimation de la charge animale dans notre cas.

2.5.2. Les éléments de surface du sol

Les éléments de surfaces sont représentés par (Sables, éléments grossiers ; croûte, litière). En zone aride ils reflètent « l'état de santé » des systèmes écologiques (Le Fl'och, 2008 ; OSS, 2004 ; 2008 ; 2013). Nous avons jugé indispensable de porter une attention particulière à l'évolution des éléments de surface du sol dans la zone puisque cette évolution prépare l'érosion des sols (Dajoz, 2006 ; OSS, 2003 ; Le Fl'och, 2008). Les éléments de la surface du sol ont subi les mêmes traitements que les espèces végétales, ils ont obéi aux mêmes lois utilisées pour caractériser leur présence dans les lieux (*Equations, 12, 13 et 16*).

3. Résultats

3.1. Analyse Floristique

3.1.1. Richesse totale

Dans l'ensemble des stations étudiées, nous avons recensé 28 espèces appartenant à 12 familles (Tableaux 8 et 9) divisées en 09 plantes vivaces et 19 éphémères (Acheb) (Annexe10).

Nous remarquons la dominance de la famille des Fabaceae avec 07 espèces suivie par les Asteraceae avec 06 espèces. La famille des Brassicaceae est représentée par 04 espèces, les Poaceae par 03 espèces. Chacune des familles des Anacardiaceae, des Caryophyllaceae, des Cistaceae, des Géraniaceae, des Plantaginaceae, des Thymelaeaceae et des Zygophyllaceae sont représentées par une seule espèce.

Dans la première unité géomorphologique, nous avons recensé 21 espèces réparties entre 10 familles et 19 genres. La famille botanique la plus présente est celle des Fabaceae représentée par six (06) espèces suivie par Asteraceae avec cinq (05) espèces. Les Poaceae sont présents

avec 03 espèces et enfin les Brassicaceae, les Cistaceae, les Euphorbiaceae, les Géraniaceae, les Plantaginaceae, les Thymelaeaceae et les Zygophyllaceae sont présentées par une espèce seulement (Tableau 10).

Tableau 10. Espèces inventoriées dans la première unité géomorphologique (Espace dunaire)

Famille	Genre	Espèce
Asteraceae	Anacyclus	<i>Anacyclus radiatus.</i>
	Atractylis	<i>Atractylis serratuloides</i> Sieb.
	Echinops	<i>Echinops spinosus</i> L
	Ifloga	<i>Ifloga spicata</i> (Forsk.) Sch. Bip.
	Launaea	<i>Launaea resedifolia</i> O.K.
Brassicaceae	Didesmus	<i>Didesmus bipinnatus</i> (Desf.)
Cistaceae	Helianthemum	<i>Helianthemum ellipticum</i> (Desf.).
Euphorbiaceae	Euphorbia	<i>Euphorbia guyaniana</i> Boiss.
Fabaceae	Argyrolobium	<i>Argyrolobium uniflorum</i> (Desc.) Jaub. Spaeh
	Astragalus	<i>Astragalus armatus</i> Willd <i>Astragalus cruciatus</i> Link. <i>Astragalus mareoticus</i> Del.
	Medicago	<i>Medicago laciniata</i> (L)
	Retama	<i>Retama raetam</i> Webb.
Géraniaceae	Erodium	<i>Erodium triangulare</i> (Forsk.)
Plantaginaceae	Plantago	<i>Plantago ciliata</i> Desf.
Poaceae	Aristida	<i>Aristida pungens</i> Desf.
	Schismus	<i>Schismus barbatus</i> (L.) Thell.
	Stipa	<i>Stipa tenacissima</i> L.
Thymelaeaceae	Thymelaea	<i>Thymelaea microphylla</i> Coss. et Dur.
Zygophyllaceae	Peganum	<i>Peganum harmala</i> L.

La richesse floristique dans la deuxième unité géomorphologique est représentée par 19 espèces, qui appartiennent à 10 familles et 18 genres (Tableau 11). Les Fabaceae restent la famille qui domine avec 06 espèces présentes. Les Astéraceae et les Brassicaceae sont représentées chacune par 03 espèces. Les Poaceae avec 02 espèces présentes. Les Capparidaceae, les Caryophyllaceae, les Cistaceae, les Euphorbiaceae, les Plantaginaceae, les Thymelaeaceae sont représentées chacune par une seule espèce chacune.

Tableau 11. Espèces inventoriées dans la deuxième unité géomorphologique (Espace inter-dunaire)

Famille	Genre	Espèce
Asteraceae	<i>Echinops</i>	<i>Echinops spinosus L</i>
	<i>Ifloga</i>	<i>Ifloga spicata (Forssk.) Sch. Bip</i>
	<i>Launaea</i>	<i>Launaea resedifolia O.K.</i>
Brassicaceae	Malcomia	<i>Malcomia aegyptiaca Spr</i>
	Notoceras	<i>Notoceras bicornis (Ait.)</i>
	Pseuderucaria	<i>Pseuderucaria teretifolia (Desf.)</i>
Capparidaceae	Cleome	<i>Cleome arabica</i>
Caryophyllaceae	Silene	<i>Silene arenarioides Desf.</i>
Cistaceae	Helianthemum	<i>Helianthemum ellipticum (Desf.)</i>
Euphorbiaceae	Euphorbia	<i>Euphorbia guyaniana Boiss</i>
Fabaceae	Argyrolobium	<i>Argyrolobium uniflorum (Desc.) Jaub. Spaeh</i>
	Astragalus	<i>Astragalus armatus Willd</i> <i>Astragalus cruciatus Link.</i> <i>Astragalus mareoticus Del.</i>
	Retama	<i>Retama raetam Webb.</i>
	Trigonella	<i>Trigonella stellata Forsk.</i>
Plantaginaceae	Plantago	<i>Plantago albicans L.</i>
Poaceae	Aristida	<i>Aristida pungens Desf</i>
	Stipa	<i>Stipa tenacissima L.</i>
Thymelaeaceae	Thymelaea	<i>Thymelaea microphylla Coss</i>

3.1.2. La richesse stationnelle

L'analyse du tableau 12, montre que la richesse floristique est variable suivant les différentes stations. La richesse floristique la plus élevée est observée au niveau de la station 03 dans la deuxième unité géomorphologique avec une présence de 12 espèces. La plus faible richesse floristique est notée aussi dans la deuxième unité géomorphologique au niveau des stations 01 et 02, qui présentent chacune 09 espèces. Dans la première unité géomorphologique la richesse floristique des stations est marquée par la présence de 10 et 11 espèces végétales.

Selon l'échelle de Daget et Poissonet (2010), nous remarquons que les deux tiers des stations inventoriées présentent un état floristique très pauvre en espèces végétales.

3.1.3. Diversité spécifique et Equitabilité dans le tapis végétal

La lecture du tableau 13 montre que la diversité spécifique (Indice de Shannon-Weaver) la plus élevée est observée au niveau de la première unité géomorphologique dans les stations 01 et 03, avec des valeurs respectives de 2,7 bits et 2,69 bits. Une valeur relativement inférieure est notée dans la station 02 de la même unité géomorphologique. Le minimum de la diversité spécifique vaut 1,54 bits est observé au niveau de l'espace inter-dunaire, dans la station 01 (Tableau 13).

L'Equitabilité (E_q) présente des valeurs élevées dans toutes les stations étudiées. Elle varie entre un maximum de 0,81 dans la station 01 de l'espace dunaire. La plus faible valeur de l'Equitabilité 0,68 est observée au niveau de la station 02 dans la deuxième unité géomorphologique.

Tableau 12. Richesse floristique dans les différentes stations étudiées

	Espace dunaire (Unité géomorphologique 1)			Espace inter-dunaire (Unité géomorphologique 2)		
	Station 01	Station 02	Station 03	Station 01	Station 02	Station 03
Richesse Totale	10	10	11	9	9	12
Nombre de famille	6	8	7	5	6	9
Nombre d'individus inventoriés	319	282	411	425	243	416
Etat de la flore	Très pauvre	Très pauvre	pauvre	Très pauvre	Très pauvre	Pauvre

Tableau 13. Evolution de la Diversité spécifique (H') et de l'Equitabilité (E_q) des espèces relevées dans les stations étudiées

	Espace dunaire (Unité géomorphologique U1)				Espace inter-dunaire (Unité géomorphologique U2)			
	Station 01	Station 02	Station 03	Moy \pm Ecartype	Station 01	Station 02	Station 03	Moy \pm Ecartype
Diversité spécifique H' (bits)	2,700	2,430	2,690	2,700 \pm 0,007	1,540	2,050	2,630	2,09 \pm 0,770
Equitabilité E_q	0,810	0,730	0,770	0,790 \pm 0,030	0,470	0,680	0,730	0,600 \pm 0,007

3.1.4. Le recouvrement global de la surface du sol par la végétation et par les éléments de surface

Les résultats obtenus montrent (Tableau 14) que le recouvrement global par la végétation présente une moyenne de 33 % dans la première unité géomorphologique et est de 36 % dans la deuxième unité. Le maximum de couverture 42% est observé dans la deuxième station de la deuxième unité. Le minimum du recouvrement global en végétation vaut 23 % est observé aussi dans la deuxième unité géomorphologique. Des valeurs intermédiaires caractérisent les autres stations étudiées.

Le sable constitue l'élément non végétal qui domine sur la surface du sol du parcours. Un maximum de 60 % est observé dans la deuxième station de l'espace dunaire, des valeurs relativement inférieures sont observées sur les espaces inter-dunaires (Tableau 14).

La fraction constituée par les éléments grossiers est inférieure à 5% sur l'ensemble des surfaces du sol des stations étudiées. La litière représente un taux de couverture variable entre un maximum de 13,5% observé dans la deuxième station de l'espace inter-dunaire et un minimum de 3 % observé dans la troisième station de l'espace dunaire.

La composante croûte des éléments de la surface du sol est relativement plus importante entre les dunes que sur les dunes. Un maximum de 15% couvre la surface de la deuxième station de l'espace inter dunaire. Le minimum du taux de couverture par la croûte est égal à 3,6 % observé dans la troisième station de la première unité géomorphologique (Tableau.14).

L'analyse de la variance (ANOVA) des taux de couverture des cinq éléments de la surface du sol effectuée au seuil de 5 %, montre que l'effet de l'unité géomorphologique est non significatif sur le taux de recouvrement par la végétation, par les sables, par les éléments grossiers et par la litière. Cependant le type de l'unité géomorphologique semble présenter un effet significatif sur la fraction de la surface du sol constituée par la croûte (Annexe I, Tableau 6).

Tableau 14. Evolution du recouvrement global de la végétation et des éléments de surface dans les deux unités géomorphologiques.

	Espace dunaire (Unité géomorphologique 1)				Espace inter-dunaire (Unité géomorphologique 2)			
	Station 01	Station 02	Station 03	Moy±Ecartype	Station 01	Station 02	Station 03	Moy±Ecartype
Végétation (%)	0,32	0,282	0,411	0,333 ± 0,067	0,427	0,232	0,416	0,360 ± 0,110
Eléments grossiers (%)	0,028	0,015	0,057	0,033 ± 0,021	0,016	0,005	0,047	0,022 ± 0,020
Sables (%)	0,550	0,618	0,463	0,543 ± 0,770	0,380	0,467	0,380	0,408 ± 0,052
Croûte (%)	0,051	0,041	0,036	0,042 ± 0,007	0,119	0,157	0,122	0,130± 0,021
Litière (%)	0,050	0,044	0,033	0,042 ± 0,008	0,057	0,135	0,035	0,075 ± 0,052

3.1.5. Valeur pastorale, productivité et charge pastorale

La valeur pastorale dans les différentes stations étudiées présente des valeurs variables entre 4 % et 9 %. La plus importante valeur pastorale est estimée pour la station 03 au niveau de l'espace dunaire. La valeur la plus faible est observée dans la station 01 de l'espace dunaire aussi. Dans l'espace inter-dunaire des valeurs intermédiaires sont observées (Tableau 15). L'analyse de la variance montre que l'effet du type géomorphologique de l'espace inventorié est non significatif sur la valeur pastorale du parcours de Mokrane (Annexe I, Tableau 9).

Les résultats de la productivité du parcours montrent pour l'ensemble des stations des valeurs variables entre 41 et 79 UF au niveau de l'espace dunaire et se situent entre 59 et 79 UF au niveau de l'espace inter-dunaire (Tableau 15). L'analyse de la variance au seuil de 5 % montre (Annexe I, Tableau 8) que l'effet du type d'unité géomorphologique est non significatif sur la productivité du parcours. En ce qui concerne la charge pastorale, les résultats (Tableau 15) présentent un minimum d'environ (5 ha /U Ovine) noté pour la station 03 de l'espace inter-dunaire et un maximum qui s'approche de (10 ha/ U Ovine) observé pour la station 01 de l'espace dunaire. L'analyse de la variance au seuil de 5% (Annexe I, Tableau 10), révèle que la charge du parcours de Mokrane n'est pas affectée par le type de l'unité géomorphologique inventoriée.

Tableau 15. Evolution de la valeur pastorale, de la productivité pastorale et de la charge pastorale

	Espace dunaire (Unité géomorphologique 1)				Espace inter-dunaire (Unité géomorphologique 2)			
	Station 01	Station 02	Station 03	Moy \pm Ecartype	Station 01	Station 02	Station 03	Moy \pm Ecartype
Productivité pastorale (UF)	41.10	57.40	79.73	59.41 \pm 19.4	70.92	50.35	79.74	70.0 \pm 17.02
Valeur pastorale	4	6.32	9.64	5.74 \pm 1.63	8.33	5.30	8.64	7.75 \pm 2.22
Charge (ha/U ovine)	9.73	7.0	5.09	7.27 \pm 2.3	5.63	7.94	5.01	6.20 \pm 1.54

4. Discussions

4.1. Richesse floristique du tapis végétal

L'inventaire floristique dans le parcours de Mokrane a permis de comptabiliser un total de 28 espèces appartenant à 12 familles botaniques, une richesse qui est considérée moyenne à l'échelle de (Daget et Poissonet, 1991). Dans l'ensemble des steppes méditerranéennes, la richesse floristique est de 3104 espèces végétales parmi lesquelles 61,4 % sont présentes en Algérie (Le Houérou, 1995). La présence de la majorité des espèces que nous avons identifiées dans Mokrane a déjà été signalé par d'autres travaux qui se sont intéressés à la biodiversité végétale dans les steppes nord africaines (Quezel et Santa, 1962 ; Ozenda, 1983 ; 2004 ; Djebaili, 1984 ; Bendali *et al.*, 1990, Le Houérou, 1995 ; Boughani, 1995 ; MATE, 2006 ; Chehma, 2005 ; Bel Oued, 2005 ; Noor *et al.*, 2006 ; El Zerey *et al.*, 2009 ; Slimani *et al.*, 2010 ; Acherkouk *et al.*, 2011 ; Salmekour *et al.*, 2013). Le nombre des espèces inventoriées dans Mokrane est environ 1% de celui qui a été recensé dans la steppe Algérienne, nos résultats sont en accord avec ceux de (Amghar et Kadi Hanifi, 2004 ; Salmekour *et al.*, 2013) qui ont inventorié des richesses floristique similaire au notre dans la région de Laghouat. Cela peut être expliqué par la nature du sol sur lequel évolue la communauté végétale rencontrée et par la nature du climat qui règne dans le parcours que nous avons étudié. Aidoud (1989) avait signalé que la richesse floristique en zone aride dépend essentiellement des espèces annuelles, des conditions du milieu et de la corrélation de l'ensemble de ces variables (climat - édaphisme -exploitation). Le parcours de Mokrane est localisé aux alentours de l'isohyète 200 mm à proximité de la limite sud des steppes de l'Afrique du Nord, sur une plaine alluviale à dominance sableuse. L'immense espace Est-Ouest de la steppe en Algérie et jusqu'à sa limite nord (400 mm) est caractérisé par la présence des sols de différentes classes (Pouget, 1981 ; Halitim, 1988), il est susceptible d'abriter les espèces qui constituent l'écart entre le nombre des espèces citées par dans d'autres études effectuées à l'échelle de l'ensemble de la steppe (Le Houérou, 1995 ; OSS, 2008), et le nombre des espèces végétales que nous signalons dans le parcours de Mokrane. Sur l'ensemble des 28 espèces inventoriés dans les unités géomorphologiques, 18 sont éphémères (66.66%) et 09 annuelles (33.33%). D'après Quezel et Santa (1962) et Ozenda, (2004), les herbes n'apparaissent que pendant une brève période de l'année, quand les conditions deviennent favorables, et les vivaces présentent des modifications morphologiques qui leur permettent de supporter l'insuffisance d'humidité et les longues périodes de sécheresse. Les éphémères (Acheb) apparaissent surtout durant la bonne saison qui coïncide généralement avec le printemps dans les steppes nord africaines. Et de ce fait la différence dans la répartition de la couverture végétale s'explique par une forme d'adaptation à la sécheresse par les vivaces qui peuvent apparaître en conditions de manque d'eau

(Ozenda, 1983). D'autre part la couverture végétale vivace intervient contre la dégradation des sols par érosion dans les pâturages (Herricka *et al.*, 1999), le taux de présence des éphémères dans le parcours de Mokrane signifie qu'en dehors des périodes de l'apparition des éphémères dans le lieu le sol serait exposé considérablement au risque de l'érosion. La faible présence de *Stipa Tenacissima* explique la dégradation du pâturage (Nedjraoui, 2003).

4.2. Fréquence spécifique (FSi) et contribution spécifique (CSi)

Les mesures réalisées ont permis de caractériser les diverses espèces de la liste floristique par leur fréquence (F_{Si}) c'est-à-dire le nombre de points où chacune d'elles a été observée. Et aussi la contribution de chaque espèce (C_{Si}) à l'ensemble de la végétation. Parmi l'effectif total des espèces inventoriées dans l'ensemble des sites *Aristida pungens* (Poaceae), *Astragalus armatus*, *Retama retam* (Fabaceae) et *Thymelaea microphylla* (Thymelacaeae) sont les espèces les plus présentes, leur contribution spécifique au tapis végétal sont relativement plus importantes que celle des autres espèces (Annexe I, Tableaux 1 et 2). Cela s'explique par le caractère psamophile de ces espèces qui se développent aisément sur substrat sableux, s'adaptent bien à la sécheresse et résistent à la rigueur des conditions climatiques (Le Houérou, 1995 ; Hellal *et al.*, 2004), en effet la fraction sableuse domine dans le recouvrement de la surface du sol au niveau de l'ensemble des stations (Tableau 14). De même (Ozenda, 2004 ; Le Houérou, 1995) rapporte que les sols sableux dans les steppes nord africaines sont généralement dominés par des Poaceae.

4.3. Diversité spécifique et Equitabilité dans le tapis végétal

Le nombre moyen d'espèces présentes par unité géomorphologique est 10 (Tableau 12). Cette valeur s'explique par la nature du sol et le type de climat qui déterminent leur distribution dans les lieux (Davis, 1948). Si nous considérons l'équitabilité (Eq), nous remarquons que l'ensemble des stations présentent des valeurs élevées ce qui traduit une répartition équitable de l'ensemble des individus inventoriés. Cela indique aussi qu'ils sont en équilibre dans ce milieu, le potentiel de la reproduction des espèces dans le parcours est sensiblement identique. Cela peut s'expliquer par l'adaptation des différentes espèces présentes aux conditions du sol et du climat qui règnent dans le parcours. D'autre part les moyennes des indices de diversité spécifique de Shannon estimées pour le parcours de Mokrane sont variables selon les stations. Les valeurs moyennes de cet indice pour les unités géomorphologiques sont 2,7 et 2,09 respectivement pour l'espace dunaire et pour l'espace inter-dunaire encroûté. Nos résultats sont similaires à ceux rapportés par Amghar et Kadi Hanifi (2004) pour des parcours dans la région de Laghouat et ceux signalés par (Rikik *et al.*, 2014) pour des parcours steppiques à l'Est de l'Algérie. Cependant ces valeurs de la diversité spécifique pour la

végétation steppique traduisent qu'une ou deux espèces dominent par leur recouvrement les autres espèces présentes, contrairement à ce qu'a révélé l'indice d'équitabilité. Les valeurs de l'indice de diversité spécifique de Shannon à Laghouat, s'explique par les taux relativement élevés de la contribution spécifique (C_{si}) de certaines espèces telles que (*Aristida pungens*, *Retama retam*, *Astragalus armatus* et *Thymelaea microphylla*) à travers l'ensemble des stations inventoriées. Et donc cet indice n'évolue pas de la même façon que l'indice d'équitabilité. (Amghar et Kadi Hanifi, 2004) avaient déjà omis cette remarque pour certains parcours à Laghouat. Il semble que l'indice de diversité spécifique est peu applicable aux zones arides et n'est pas très pertinent pour expliquer la diversité floristique dans les cas extrêmes (OSS, 2013). Des études antérieures sur la végétation de Mokrane n'existent pas, elles auraient contribué au suivi de la dynamique du parcours de Mokrane. Les valeurs élevées des indices d'équitabilité de la végétation à Mokrane reflètent un équilibre dans la répartition des espèces. Une étude menée dans la steppe sud ouest entre 1978 et 2003 a montré que des groupements de psammophytes à dominance de *Thymelaea* inexistantes en 1978 dans un parcours à graminées dominées par *Stipa*, ont connu en 2003 une extension due à un ensablement plus important durant la période de sécheresse de 1981-1987 ; pendant laquelle les vents ont donné aussi naissance à des microdunes qui n'existaient pas en 1978 (Nedjraoui et Bédrani, 2008). La faible contribution de *Stipa Tenacissima* au tapis végétal dans Mokrane et la forte présence de *Thymelaea microphylla* serait donc un état de dégradation de la végétation du parcours à Laghouat. Et par conséquent les valeurs de l'indice de l'équitabilité de la végétation observées à Mokrane reflètent un équilibre de dégradation.

4.4. Recouvrement de la surface du sol

Le recouvrement de la surface du sol du parcours de Mokrane varie selon les différentes stations. Il est situé entre 33 % et 36 %, le reste du recouvrement moyen est occupé par la partie non végétale représentée par les éléments (sables, éléments grossiers, croûte et litière). Ces taux moyens de recouvrement par les végétaux sont inclus dans les mêmes intervalles de taux recouvrement rapportés par (Salmekour *et al.*, 2013) dans des mises en défens dans d'autres communes de la wilaya de Laghouat.

Un taux de recouvrement par la végétation de 30 à 35 % engendre l'augmentation de la vitesse seuil de déflation des particules à la surface du sol (Coudée Gaussen et Rognon, 1995 ; Boudad *et al.*, 2003). De nombreuses études ont montré que la couverture végétale joue un rôle essentiel dans la protection des sols contre leur dégradation par le vent (Lancaster and Baas, 1998 ; Rajot, 2001 ; Biolders *et al.*, 2002, 2004 ; Leenders *et al.*, 2007 ; Yan *et al.*, 2011 ; Touré *et al.*, 2011). Dans notre cas la superficie du parcours couverte par la partie végétale représente environ le tiers de la surface

totale (Tableau 11), cela implique aussi que sa distribution est éparse, ce qui expose le sol au haut risque de dégradation par érosion éolienne (Li et al, 2007). En effet une végétation suffisamment dense intervient en faveur de la protection des sols contre la dégradation par le vent par son action à réduire la vitesse seuil de soulèvement des particules (Woodruff et *al.*, 1972). L'écart observé entre les taux de recouvrement par la partie végétale et la partie non végétale traduit une évidente dégradation du milieu et peut s'expliquer par des conditions défavorables pour le bon développement des communautés végétales, notamment sécheresse et pauvreté du sol en éléments essentiels.

Les sables occupent une importante part sur la surface du parcours de Mokrane, représentée par un taux moyen de 57,55 %. Cette fraction constitue aussi la composante qui domine dans toutes les stations inventoriées (Tableau 15). Un suivi dans le temps aurait permis de voir l'évolution de cette composante. L'origine probable du sable dans le pâturage est les alluvions d'Oued M' zi qui délimite le parcours par le Nord (Figure 40). Il constitue une source permanente d'alluvions sableux pour la zone de Mokrane et dont les déplacements sont accentués le faible taux de couverture végétale, par les vents agressifs et par la sécheresse qui va aussi à l'encontre du développement des plantes pérennes, dont la présence pourraient augmenter la rugosité du sol, décroître les risques d'érosion éolienne et réduire aussi les risques de pertes de matières organiques susceptibles d'être déplacées par le vent avec les fines particules (Zhao et *al.*, 2005). En effet sur un parcours pâturé dans la steppe ouest et à travers 30 années de suivi, (Slimani et al, 2010) ont mesuré, un accroissement du taux de couverture du sol par le sable en raison de la réduction de la couverture végétale pérenne conséquence d'une sécheresse prolongée.

Des analyses sur un ensemble de 136 échantillons à travers la zone de Mokrane montrent que la fraction érodible ($< 840 \mu\text{m}$) est présente à plus de 85 % dans les sables de la surface du sol de Mokrane (Boumedienne, 2014), cette fraction conjuguée aux taux de couverture par la végétation favorise donc le risque de déflation au niveau du parcours.

Les éléments grossiers relevés dans le parcours sont présents avec un taux moyen d'environ 2,7 %, ils sont constitués de cailloux dont les diamètres sont variables de quelques millimètres à quelques dizaines de millimètres. La seule explication probable de l'origine de ces cailloux serait le glacier de Oum Deloua qui délimite la zone de Mokrane au Nord et à l'Ouest et le glacier de Lahmar qui la délimite du côté Est.

La surface du sol couverte par la croûte présente une différence significative en fonction du type d'unité géomorphologique. Nos relevés montrent des taux moyens de 4% et de 13 % respectivement dans l'espace dunaire et dans l'espace inter-dunaire. Cela révèle que les espaces inter-dunaires

sont moins drainées. Les encroûtements superficiels sont une spécificité des sols fragiles facilement mobilisables, ceux sont aussi de bons indicateurs de fonctionnement des sols à faible stabilité structurale, ils se forment à la faveur des fortes pluies quand les sols sont faiblement perméables (Casenave and Valentin, 1989 ; Valentin et Bresson, 1992). Les fractions d'encroûtement inventoriées révèlent que l'unité géomorphologique du parcours de Mokrane présente une faible stabilité structurale. Vraisemblablement, ces croûtes se seraient formées suite aux splash de fortes pluies dont les eaux se seraient stagnées temporairement et provoquer une réorganisation des particules granulométriques superficielles en raison de la faible conductivité hydraulique du sol. Des études menées en zones semi-arides et arides de l'Afrique subsaharienne ont montré que la structure fragile d'un sol favorise la mobilité de ses particules superficielles, elle provoque aussi leur réorganisation en même temps que celle des agrégats aboutissant ainsi à la formation d'encroûtements (Valentin, 1991 ; Valentin et Bresson, 1992 ; Ambouta et *al.*, 1996).

Le taux de litière inventorié sur la surface du parcours est faible et ne présente pas de différence significative en fonction des deux unités géomorphologiques. La litière dans le lieu se compose principalement de débris de végétaux. Au niveau de l'espace inter-dunaire elle est beaucoup plus importante qu'au niveau de l'espace dunaire. Ceci peut être expliqué par l'exposition de l'unité géomorphologique. L'espace inter-dunaire présente un relief convexe entouré de dunes, il offre moins de possibilité aux débris des végétaux à mobilité par le vent. Des débris de végétaux qui peuvent contribuer aux apports de matières organiques dans les lieux et expliquent aussi le taux de recouvrement par la végétation relativement plus important.

4.5. Valeur pastorale, productivité pastorale et charge du parcours

Le parcours de Mokrane à Laghouat présente une valeur pastorale moyenne d'environ 6,5 % estimée durant une période où la végétation était supposée optimale. Comparativement (Hirche et *al.*, 1999), estiment 7% pour un pâturage de la steppe Sud Ouest algérien dans la région de Naïma. Dans la même région en 2007 (Benaradj *et al.*, 2013), calculent une valeur pastorale de 4 % pour un parcours à Sparte. Outat (2004) au Maroc signale sur une moyenne de deux ans une valeur pastorale de l'ordre de 5,3%, considérée comme proche de nos résultats. Par contre les résultats, établis par OSS (2008) sur les potentialités des parcours ouest algériens rapportent une valeur pastorale plus élevée de l'ordre de 11%. 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, cet indice a été sujet à de nombreux débats.

Il fait intervenir pour son calcul des indices spécifiques de qualité dont les valeurs sont variables d'un auteur à l'autre, mais des enquêtes menées auprès d'éleveurs dans la steppe algérienne ont rapportées que ces derniers étaient favorables aux scores attribués aux indices spécifiques des différentes espèces qui colonisent les pâturages (Aidoud, 1983 ; Daget, 2002). Les valeurs des indices spécifiques sont constantes dans l'espace et dans le temps alors que les propriétés nutritives des espèces varient selon les saisons et les milieux environnants. Cependant le fait que l'inventaire de la végétation soit réalisé pendant un temps court, au moment de l'optimum de la flore, il synthétise de ce fait la dynamique annuelle du parcours et constitue par conséquent un bon indicateur de sa productivité (Aidoud et *al.*, 1982 ; Aidoud, 1983).

Les indices spécifiques des végétaux ne sont pas toujours explicatifs de la faiblesse de la valeur pastorale car parfois les animaux broutent des espèces à indices nuls ou parfois même toxiques et continuent à vivre. L'équation 23 reste à la fois la plus simple et la plus efficace pour la végétation des zones arides notamment celle de la steppe algérienne (Hirche *et al.*, 1999).

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 moyenne de la flore qui caractérise le parcours et par la nature des espèces végétales présentes qui ne sont pas toutes fourragères. Parmi les plantes inventoriées plus de 71 % des espèces ont des indices pastoraux spécifiques médiocres (≤ 2) révélateurs de valeurs énergétiques faibles. Environ 22 % des espèces possèdent des qualités énergétiques moyennes avec des indices pastoraux spécifiques ($3 < I_s < 5$), mais seulement 7 % des plantes inventoriées possèdent de bonnes qualité fourragères avec des indices spécifiques supérieurs à 5 (*Medicago lacitania* et *Plantago albicans*) mais faiblement présentes dans le lieu. La faiblesse de la valeur pastorale peut aussi être du à la dominance du parcours des psammophytes notamment *Thymelaea microphylla*, *Aristida pungens*, *Retama retam* et *Astragalus armatus* et qui présentent aussi des qualités fourragères (indices spécifiques) moyennes et médiocres. Ces espèces psammophiles et résistantes à la sécheresse sont probablement révélatrices d'une dégradation du parcours.

Dans les steppes à psammophytes du sud Oranais, (Nedjraoui, 1981) estima des productivités pastorales maximales entre 200 et 250 UF/ha (Nedjraoui, 1981). Les valeurs à Laghouat sont variables entre 41 et 79 UF/ha, (Tableau 15), similaires à celles rapportées par (Salmekour *et al.*, 2013) pour d'autres pâturages dans la steppe à Laghouat. Toutefois la productivité du parcours à Laghouat ré-

vèle 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 (Nedjraoui, 1981) 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. En effet les quantités de pluies reçues sont prépondérants pour le développement des communautés végétales des steppes (Djebaili *et al.*, 1989 ; Daget et Poissonet, 1997 ; OSS, 2008). Pendant l'hiver (Décembre 2009 à Mars 2010) qui a précédé nos inventaires de la végétation, la région de Laghouat a reçu un cumule de 37 mm. Cet hiver fut le plus sec depuis 2005 (ONM, 2012). En conséquence le taux de recouvrement estimés par nos relevés serait relativement perturbé par la faiblesse des précipitations et donc une productivité plus élevée du parcours aurait pu être estimée pendant d'autres meilleures années (Tableau 23).

Les valeurs pastorales et les productivités estimées occasionnent pour le parcours des charges pastorales moyennes variables de 6 et 7 ha / U Ovine. Cette valeur est proches de celles estimées durant la même période dans d'autres lieux de la steppe algérienne (Salmekour et al, 2013, Bendarradji et al., 2013, Rikik *et al.*, 2014). 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 steppe algérienne (Boukhobza ,1982 ; Nedjraoui, 2003).

5. Conclusions

L'étude de l'état de la surface du sol d'un parcours steppique dans la région de Laghouat, nous a permis d'inventorier une richesse totale de 28 espèces végétales qui appartiennent à 12 familles botaniques. Dans cet effectif, 8 familles ne sont représentées que par un seul genre. Les familles botaniques les mieux représentées sont celles des Fabaceae (7 espèces), les Asteraceae (5 espèces), les Brassicaceae (4 espèces), les Poaceae (3 espèces). Pour la répartition temporelle, sur les 27 plantes présentes, 18 sont éphémères et 9 espèces vivaces. Cette importance des éphémères semble émaner de la période d'échantillonnage qui est favorable à leur développement dans la région.

La présence de nombreuses psammophytes, les valeurs élevées de l'indice de l'équitabilité (68 à 81 %) et la faible présence de *Stipa Tenacissima* indiquent clairement que le milieu étudié est bien dégradé.

Le taux moyen de recouvrement par la végétation était environ 34 %, valeur en faveur de la déflation des particules érodibles dans le parcours. Les sables occupent la plus importante part (57,55 %) sur la surface du sol nu et dont la composition granulométrique est en faveur des transports éoliens.

Le parcours de Mokrane a montré deux unités géomorphologiques qui se distinguent par une différence de présence de zones encroûtées. Cette différence serait due à un mauvais drainage des eaux pluviales dans l'espace inter-dunaire en raison de la convexité de la surface de son sol, mais qui reflète bien sa dégradation physique.

L'utilisation d'indices empiriques pour l'évaluation pastorale de Mokrane a dégagé son caractère médiocre, qui l'aligne avec nombreux parcours de la steppe algérienne. L'approche utilisée résulte des travaux d'Aidoud (1983) et Nedjraoui (1981) pour la détermination de la production fourragère et de la valeur nutritive des principales espèces physionomiquement dominantes dans les hautes plaines steppiques du sud oranais et reste parmi les plus valables pour l'évaluation des parcours steppiques algériens (Hirche *et al.*, 1999). La productivité estimée pour le pâturage de Mokrane était faible, pouvant occasionner une charge pastorale de l'ordre de 7 ha par mouton, valeur élevée relevant donc la médiocrité de la zone à intervenir dans les systèmes de productions agricoles du pays.

La zone de Mokrane constitue un échantillon parmi les vingt millions d'hectares de la steppe, il est sous une pression anthropique due essentiellement à une exploitation ne répondant à aucun plan de gestion rationnel qu'il faudrait impérativement revoir.

Conclusions générales

La dégradation des terres est un problème qui menace les ressources du tiers de la population mondiale. L'Afrique est la zone de la planète la plus affectée par ce phénomène, elle abrite aussi environ la moitié de la population mondiale concernée. Le nord du continent n'est pas épargné et parmi les terres touchées par la dégradation on compte environ onze millions d'hectares en Algérie, localisées principalement dans les zones des parcours steppiques.

Les causes de la dégradation de la steppe sont multiples et peuvent être classées selon trois catégories : naturelles, socio-économiques et réglementaires. Pour les causes naturelles, il s'agit d'une manière générale du climat et principalement la sécheresse cyclique. En ce qui concerne les causes socio-économiques, elles relèvent de multiples domaines. Elles sont liées aux pratiques culturelles et/ou d'élevage, mais aussi à l'accroissement de la population locale confronté au manque de création d'emplois. Ces éléments sont étroitement liés à tel point qu'il est difficile ou même impossible de les dissocier. Les causes réglementaires sont quand à elles liées aux politiques adoptées depuis 1962 au cours de la succession des différents gouvernements.

Les processus de la dégradation des terres sont multiples, à l'échelle de la planète l'érosion éolienne occupe une part relativement importante de responsabilité. Elle affecte aussi plus de la moitié des terres dégradées en Afrique et de part sa position géographique l'Algérie est tout à fait touchée par ce processus dangereux. Pour cela le présent travail a été entrepris dans une région steppique.

Nos travaux de recherches se sont déroulés dans la wilaya de Laghouat localisée sur le pied mont sud de l'Atlas Saharien dans la steppe sud Algéroise. Plus des deux tiers du vaste territoire de la wilaya sont couverts par des parcours steppiques ; ce territoire présente aussi d'importants risques à la dégradation par érosion éolienne. La wilaya connaît un accroissement de la population qui a presque triplée au cours de ce dernier quart du siècle. Une population qui a tendance à se concentrer de plus en plus dans les agglomérations urbaines et probablement pour désertier les conditions difficiles d'espaces devenus défavorables à toute forme de vie rurale.

La vocation pastorale de la wilaya est reflétée par le nombre de têtes du cheptel ovins qui a aussi triplé durant cette dernière vingtaine d'années. Le support de ce cheptel est les zones des parcours steppiques, dont les deux tiers sont déclarés par les services de l'agriculture de la wilaya dégradés, alors qu'uniquement une fraction de 6% est classée bon pâturage. Le rapport entre le nombre du cheptel ovin et les espaces supposés aptes au pastoralisme révèle un clair surpâturage à Laghouat, illustrant aussi une pression accrue sur les ressources végétales naturellement présentes.

Les grandes étendues concernées par la mise en culture dans la wilaya appartiennent au domaine privé de l'Etat et sont en majorité localisées dans des périmètres agricoles issus des politiques gouvernementales. Les derniers périmètres agricoles à Laghouat ont été implantés suite à la loi 19/87 qui date de 1987, cela explique aussi pourquoi la SAU de la wilaya n'a pas augmenté au cours de ces dernières vingt cinq années. Durant cette même période on remarque de légères contre balance entre les espaces concernés par les cultures irriguées et les espaces mis en jachère. Les programmes du développement agricole lancés après l'année 2000 sont à l'origine de l'accroissement des superficies cultivées en irrigué et du déclin de la mise en repos des terres agricoles. Les aides financières octroyées ont favorisé le pompage de l'eau et aussi l'acquisition de nombreux moyens de production (semences, engrais, matériels...) afin de faciliter les taches aux agriculteurs dans les périmètres agricoles. A l'inverse des autres terres de la SAU de la wilaya, les superficies consacrées aux cultures pluviales n'ont pas changé. Après un accroissement durant les années 1990, on remarque qu'elles ont plutôt chuté jusqu'à 2006, année à partir de laquelle les espaces des cultures pluviales sont restées relative stables. Bien que le manque de précipitations est une spécificité d'une grande partie des aires de la wilaya, la mise en culture en pluvial signifie au vu des services agricoles et des populations locales que le terrain cultivé est sous tutelle d'un exploitant. Malgré que les pluies reçues par la céréale en place ne permettent souvent pas de la récolter, le labour préserve le terrain de l'expropriation. D'un autre coté, les subsides de l'Etat pour le développement de l'agriculture à Laghouat n'ont donc pas été en faveur de la réduction des superficies cultivées en pluviale dans cette wilaya steppique. Cette pratique explique la tendance à demander au milieu plus qu'il ne peut en donner. La wilaya présente en grande partie un déficit pluviométrique qui va à l'encontre du développement des plantes cultivées en dépendance des précipitations. Les sols de la steppe sont réputés d'être fragiles et le labour favorise une déflation dangereuse qui facilite leur érosion par le vent. L'objectif principal visé par la thèse était de quantifier l'effet du vent sur un parcours converti en terre cultivée. Le travail a été mené sur un champ expérimental localisé dans le parcours de Mokrane à quelques mètres d'un périmètre agricole issu de la loi 18/83. Les résultats des mesures sur le terrain effectuées en continu pendant 25 mois permettent d'apporter les conclusions suivantes :

- La saltation enregistrée illustre bien l'existence d'une activité éolienne à Laghouat. Le développement de la couverture végétale cultivée en pluviale n'a pas contribué au maintien des particules du sol en place. Le détachement et le soulèvement des sédiments reflètent donc la fragilité structurale du sol de la zone agricole lieu de l'étude. L'activité éolienne à Laghouat n'est pas saisonnière et peut se produire pendant plusieurs périodes de l'année. Elle a été observée par moments durant les quatre saisons de l'année au cours de laquelle les enregistrements du saltiphone ont lieu. Les plus forts taux de la saltation étaient observés au printemps entre Mars et Avril. Quand elle s'opère, la saltation peut être diurne ou nocturne. La majeure partie de la saltation à Laghouat est enregistrée

dans le secteur des directions de vent Nord-Ouest et Nord. Les flux du nord (westerlies) sont donc les plus responsables de l'activité éolienne à Laghouat dans la steppe centrale.

- Les tempêtes de sable durent plusieurs heures à plusieurs jours à Laghouat. Durant ces tempêtes nous avons déterminé des événements érosifs de durées très variables allant de quelques minutes à plusieurs heures.
- L'activité éolienne était parfois marquée par la manifestation de la pluie dont les quantités étaient relativement faibles et n'influaient pas les calculs des bilans de masse.
- Les valeurs des vitesses seuil de l'érosion éolienne à Laghouat sont incluses dans les intervalles des vitesses seuil observées dans d'autres régions du monde. A Laghouat, elle ne présentait pas d'importants écarts entre les valeurs observées. Les mesures effectuées en continu pendant une période de onze mois ont permis de noter aussi une très légère saisonnalité de ce paramètre déterminant de l'activité éolienne qui a été attribué au développement de la culture en place. Les valeurs élevées du seuil de l'érosion sont notées au printemps alors que des valeurs relativement faibles sont observées en été.
- Les mesures des flux de sédiments ont permis de déceler que le plus important transport éolien à Laghouat se produit dans les premiers 50 cm au dessus de la surface du sol. Les quantités de sédiments collectés à 1 m de la surface du sol étaient toujours très faibles et ne permettaient pas de les peser afin de les inclure dans le calcul des flux.
- Le dysfonctionnement de la station météo nous a privé de faire un suivi en continu des paramètres intervenants durant l'activité éolienne dans la région de Laghouat. Néanmoins la faible variation de la vitesse seuil de l'érosion durant les événements éoliens et l'inclusion à plus de 95 % des vents érosifs dans le secteur des directions Nord-Ouest Nord pendant les enregistrements effectués au cours des onze premiers ont permis d'utiliser ces paramètres pour le calcul de l'érosion éolienne durant les moments où la saltation n'a pas pu être enregistrée. Des analyses de sensibilité ont montré qu'une très bonne relation existait entre la direction du vent pendant la saltation et la direction du vent pour toutes les vitesses supérieures au seuil de l'érosion, cela nous a facilité donc l'estimation de la direction du vent pouvant induire la déflation des sédiments sans mesurer la saltation dans la région de Mokrane. De la même manière en testant la sensibilité du bilan de masse durant la saltation au bilan de masse pour toutes les directions du vent quand les vitesses sont supérieures au seuil de l'érosion, les résultats ont montré aussi une très bonne relation entre ces deux paramètres, ce qui nous a conduit à pouvoir estimer le bilan de masse de façon tout à fait satisfaisante à partir des directions du vent pour toutes les directions des vitesses du vent supérieures au seuil de la saltation.
- Les bilans de masse mesurés durant les vingt cinq mois de nos travaux de terrain montrent une importante érosion du sol cultivé en pluviale dans la région de Laghouat, ce bilan de masse est le

plus lourd par rapport à ceux mesurer dans d'autres régions du monde. Et de ce fait notre travail met l'index sur une telle pratique très répandue depuis des décennies dans toute la steppe algérienne. Une aussi importante dégradation des parcours par érosion éolienne laisse donc à réfléchir sur le sort des milliers d'hectares de terres qui sont annuellement défrichés pour une mise en culture pluviale et dont les récoltes sont généralement incertaines au vu des exploitants de ces terres.

- Les relevés de la végétation naturellement présente dans le parcours de Mokrane montraient que le lieu présentait une richesse floristique moyenne et une diversité spécifique qui relèvent certainement des conditions du milieu dans lequel ces espèces se trouvent, notamment la nature du sol et les précipitations annuellement reçues. Le taux de recouvrement par une végétation psamophile était environ le tiers de la surface du sol du parcours, mais la plus grande partie était couverte par des sables. D'autres mesures non incluses dans ce document ont montré que les sables de la zone de Mokrane étaient constitués à plus de 84 % par la fraction érodible susceptible d'être facilement transportée par le vent, et pour autant donc en faveur d'une activité éolienne dans les lieux. Les groupements des espèces identifiées dans le parcours de Mokrane présentaient 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 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 nombreuses fois 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 pâturage de Mokrane qui a présenté les caractères de l'ensemble de la steppe algérienne.
- Nos résultats illustrent bien, le danger de la mise en culture en pluvial de ce sol steppique convertis en terre cultivée et la prudence à prendre en compte en cas d'un éventuel pastoralisme dans la zone lieu de l'étude.
- En conséquence les politiques gouvernementales devraient viser à prévenir la conversion des parcours de la steppe en terre de culture pluviale.

Perspectives

- ❖ Les résultats présentés dans cette thèse ont une signification régionale. L'extension spatiale de notre travail était limitée, pour des raisons essentiellement pratiques et financières.
- ❖ Ce travail ouvre de nombreuses perspectives scientifiques pour des mesures de l'érosion éolienne dans les zones à hauts risques de l'Algérie steppique. Nous pensons à cette variante d'états de la surface des sols steppiques et aussi à d'autres unités d'occupation du sol qui devraient également être étudiées au niveau des vingt millions d'hectares des parcours algériens, notamment les espaces de pâturages et d'autres espaces cultivés, en prenant en considération les systèmes d'élevage, les systèmes de cultures qui se pratiquent dans l'ensemble des unités géomorphologiques afin de pouvoir étendre ces premiers résultats à toute la steppe algérienne.
- ❖ L'étude de différentes méthodes de la conservation des sols contre la dégradation par le vent devraient aussi être étudiées afin de prévoir les techniques antiérosives qui s'adaptent le mieux au contexte steppique de l'Algérie en tenant compte du coût et de la durabilité des dispositifs à mettre en place.
- ❖ Les mesures ont montré que les tempêtes de sables à Laghouat se produisaient souvent pendant des durées de plusieurs jours successifs, ils nous ont conduits à calculer des flux cumulés. Cette longueur de la durée des vents de sable ne nous a pas permis de voir l'effet d'un événement éolien en matière de bilan de masse sur la parcelle cultivée en pluvial. Les durées entre deux événements éoliens ne suffisaient toujours pas pour aller à la parcelle expérimentale afin de vider les BSNE et retourner pour l'estimation des flux au cours d'un seul événement éolien. La steppe algérienne est très vaste est probablement l'effet d'un seul événement éolien pourra être mesuré quelque part dans un des points de ce territoire.
- ❖ La panne de la station météo nous a empêchés de faire une étude plus affinée du processus éolien dans la région de Laghouat. Des mesures plus longues auraient certainement permis d'avoir plus d'observations et renforcé davantage notre travail de terrain. On fait insinuation à la dynamique des vents érosifs en matière de vitesses et de directions. Aussi bien que l'effet du développement de la végétation sur la rugosité aérodynamique.
- ❖ Pour calculer les flux des sédiments éoliens nous avons fait recours à la méthode des trapèzes car pour la majorité des mats les modèles proposés dans la littérature n'ont pas donné des résultats satisfaisants. Mais le fait que pour certains mats l'équation de puissance modifiée a donné des résultats satisfaisants cela donc exclut que ces modèles ne conviennent pas aux calculs des flux dans la ré-

gion de Laghouat. D'autres mesures donc permettront de confirmer la méthode ou le modèle fiable pour mesurer les flux à Laghouat.

- ❖ Les informations qui concernent les superficies concernées par la mise en culture pluviale dans la wilaya de Laghouat proviennent des statistiques des services de l'Etat. Mais bien nombreuses terres tribales ou privées défrichées et mise en culture en pluviale dans les parcours steppiques restent généralement méconnues à défaut d'être déclarées par leurs propriétaires.
- ❖ Le travail présenté dans cette thèse constitue le premier pas en Algérie steppique dans les mesures de la dégradation par le vent des terres agricoles. Les résultats des bilans de masse mesurés montrent l'importance du processus éolien dans la dégradation des terres défrichées et mise en culture pluviale dans la steppe. Et pour autant ils constituent des éléments à prendre en compte dans la gestion des aires de cet espace fragile.
- ❖ La désertification et la dégradation des parcours steppiques Algériens sont fortement médiatisés mais mal appréhendés. La plus importante partie des parcours appartient aux domaines privés de l'Etat, en conséquence ce sont les politiques gouvernementales qui peuvent du moins préserver cette importante ressource naturelle. Notre travail constitue un support pour les décideurs quand aux défrichements pour la mise en culture en pluvial dans la steppe Algérienne. De même, la prudence à prendre dans le cas de la pratique du pastoralisme dans la région de Laghouat.

Références Bibliographiques

- Abaab, A., Bédrani, S., Bourbouze, A., Chiche, J., 1995.** Les politiques agricoles et la dynamique des systèmes agropastoraux au Maghreb. Les agricultures maghrébines à l'aube de l'an 2000. Montpellier : Ciheam .139-165. Options méditerranéennes : séries B. Etudes et recherches, n°14.
- Abdelguerfi, A., et Laouar, M., 1996.** La privatisation du foncier, impact sur l'environnement et sur les ressources génétiques en Algérie. in : Pastoralisme et foncier : impact du régime foncier sur la gestion de l'espace pastoral et la conduite des troupeaux en régions arides et semi-arides. 17-19 octobre 1996, Gabès, Tunisie. Option Méditerranéennes n° 32, pp. 203-207.
- Abdel Hakim, T., 2009.** Regards sur des expériences en Algérie et en Egypte. In : Abis S. (Coord.), Blanc P (Coord.), Lerin F. (Coord.), Mezouaghi M. (Coord.). Perspectives des politiques agricoles en Afrique du Nord. Paris : CIHEAM p. 142 -171 (Options Méditerranéennes : Série B. Etudes et Recherches, n.64.
- Abdellaoui, A., 2009.** Potentialité de l'imagerie satellitaire moyenne résolution pour le suivi du transport de sable en milieu urbain Pré-saharien", Séminaire International : « Dynamiques des paysages et Télédétection », Tunis, 9-13 juin 2009.
- Acherkouk, M., Maatougui, A., et El houmaiz, M.,A., 2011.** Communautés végétales et faciès pastoraux dans la zone de Taourirt-Tafoughalt du Maroc oriental : écologie et inventaire floristique. Acta Botanica Malacitana, 36 : 125-136.
- Aidoud, A., Nedjraoui, D., Djebaili, S., et Poissonet, J., 1982.** Evaluation des ressources pastorales dans les Hautes plaines steppiques du sud oranais : productivité et valeur pastorale des parcours, Biocénose, 1, 2 : 43-62.
- Aidoud, A., 1983.** Contribution à l'étude des écosystèmes steppiques du Sud oranais : phytomasse, productivité primaire et applications pastorales, Thèse, USTH Boumedienne, Alger, 245 p.
- Aidoud Lounis., 1984.** Contribution à la connaissance des groupements à sparte (*Lygeum spartum* L) des hauts plateaux sud-oranais. Thèse 3eme cycle, USTH Boumedienne, Alger, 253p.
- Aidoud, A., 1989.** Contribution à l'étude des écosystèmes pâturés des hautes plaines Algéro-oranaises. Fonctionnement, évaluation, et évolution des ressources végétales. Thèse de Doctorat. USTHB, Alger. 257 p.
- Aidoud, A., et Touffet, J., 1996.** La régression de l'alfa (*Stipa Tenacissima*) graminée pérenne, un indicateur de désertification des steppes algériennes. Sécheresse (Paris), Vol 7, N° 3: 187-193.
- Alali, A., et Benmohammadi, A., 2013.** L'ensablement dans la plaine de Tafilalet (sud-est du Maroc. Larhyss /Journal n° 16, Décembre : 53-73.
- Ambouta, JMK, Valentin, C. et Laverdière, M., 1996.** Jachères et croûtes d'érosion au Sahel. Sécheresse 7 ; 269-275.
- Amghar, F., Kadi-Hanifi, H., 2004.** Effet du pâturage sur la biodiversité et l'état de la surface du sol dans cinq stations à alfa du Sud Algérois. In : Ferchichi A. (comp.), Ferchichi A. (collb.). Réhabilitation des pâturages et des parcours en milieux méditerranéens. Zaragoza : CIHEAM, 2004, P 399 - 402 Cahiers Options Méditerranéennes, n° 62.
- Aubert, G., 1960.** Les sols de la zone aride : étude de leur formation, de leurs caractères, de leur utilisation et de leur conservation. Actes Colloque UNESCO Paris sur les problèmes de la zone aride. 127-150. Paris UNESCO Arid Zone Res.
- Augustin, B., 1898.** Hautes-plaines et steppes de la Berbérie. Bull. Soc. Géog. et Archéol. Oran, XVIII, 18-30.
- Augustin, B., et Ficheur, E., 1902.** Les régions naturelles de l'Algérie. Annales de Géographies. t11, n°60. pp. 419-437. DOI:10.3406/géo.1902. 18191.

- Aziki, S., 2003.** Plateforme sur les programmes prioritaires et les possibilités de partenariat dans le cadre de la mise en œuvre du programme d'Action National de la Lutte Contre la Désertification-MADR, Rabat, Maroc.
- Bagnold, R., A., 1941.** The physics of blown sand and desert dunes. Methuen, London, 265 p.
- Bagnold, R., A., 1943.** The Physics of blown Sands and Desert Dunes, William. Morrow and Co., Inc., New York, 265 p.
- Bagnouls, F., et Gaussen, H., 1953.** Saison sèche et indice xérothermique, Bull. soc. Hist. Nat., Toulouse, : 193-239.
- Bagnouls, F., et Gaussen, H., 1957.** Annales de Géographie, 66, 355 : 193-220.
- Barchyn, T., E., and Hugenholtz, C., H., 2011.** Comparaison of four methods to calculate aelian sediment transport from field data: Implications for transport prediction and discussion of method evolution. Geomorphology, 129: 190-203.
- Bédrani, S., 1991.** Legislation for livestock on public lands in Algeria. Nature & ressources, Vol. 27, N°4 : Unesco. 7 p.
- Bédrani, S., 1993.** Les aspects socio-économiques et juridiques de la gestion des terres arides dans les pays méditerranéens. Etat de l'Agriculture en Méditerranée. Les sols dans la région méditerranéenne : utilisation, gestion et perspectives d'évolution. Zaragoza. Cahiers Options Méditerranéennes. CIHEAM. N° 1 : 69 -7 7.
- Bédrani, S., 1994.** Le développement des zones de parcours en Algérie. Étude Banque mondiale, Washington.
- Bédrani, S., 1995.** Une stratégie pour le développement des parcours en zones arides et semi aride. Algérie, Document de la banque mondiale, 61 p.
- Bédrani, S., 1998.** Désertification et emploi en Algérie". In les Cahiers du CREAD, n° 4, 1998.
- Beloued, A., 2005.** Plantes médicinales d'Algérie. OPU Alger, 284p.
- Benazzouz, M.T., 2000.** Morphogenèse éolienne Holocène et actuelle dans l'Atlas saharien oriental (Algérie). Conséquences sur la désertification. Thèse de doctorat d'État en géomorphologie, Faculté des sciences de la terre de géographie et aménagement du territoire (STGAT), université de Constantine, Algérie 235 p.
- Benblidia, N., Abdellaoui, A., Guessoum, A., Bensaid, A., 2013.** Utilisation de la morphologie mathématique pour l'analyse de l'occupation de l'espace en zones urbaines et périurbaines présahariennes : cas de Laghouat (Algérie). Télédétection Vol 6 (2) : 177-190.
- Benchetrit, M., 1972.** L'Erosion actuelle et ses conséquences sur l'aménagement en Algérie. Presses Universitaires de France, Paris.
- Benaradj, A., boucherit H., Hasnaoui, O., Mederbal, K., & Sehli, A., 2013.** Rehabilitation of the steppe *Lygeum spartum* in the region of Naama (Western Algeria). Energy Procedia, 36 : 349 – 357.
- Bendali, F., Floret, C., Le Floc'h, E., & Pontanier, R., 1990.** The dynamics of vegetation and sand mobility in arid regions of Tunisia. Journal of Arid Environments, 18: 21-32.
- Benderradji, M., H., Alatou, D., Arfa, A., M., T., Benachour, K., 2006.** Problèmes de dégradation de l'environnement par la désertification et la déforestation Impact du phénomène en Algérie. New medit: 4 – 8 p.
- Benkouider, F., Abdellaoui, A., Hamami, L., Elaihar, M., 2013.** Spatio temporal analysis of vegetation by vegetation indices from multi-dates satellite images: Application to a semi arid area in Algeria. Energy Procedia, 36: 667-675.
- Benmohammadi, A., Benmohammadi, L., Ballais, J.L., Riser, J., 2000.** Analyse des interrelations anthropiques et naturelles : leur impact sur la recrudescence des phénomènes d'ensablement et de désertification du sud-est du Maroc (vallée de Drâa et vallée de Ziz). Sécheresse ; 11 : 297-308.
- Bensaid, A., 2006.** Sig et télédétection pour l'étude de l'ensablement dans une zone aride : le cas de la wilaya de Naama (Algérie). Université Joseph Fourier ,Grenoble I , Thèse de Doctorat, 318 p.
- Benslimane, M., Hamimed, A., El Zerey, W., Khaldi, A., et Mederbal, K., 2008.** Analyse et

suivi du phénomène de la désertification en Algérie du nord. VertigO, Vol.8, n°3, pp : 1-9.

- Biielders, C.L., Michels, K., Rajot, J.L., 2000.** On-farm evaluation of ridging and residue management practices to reduce wind erosion in Niger. Soil Science Society of America Journal, 64: 1776–1785.
- Biielders, C.L., Vrieling, A., Rajot, J.L., Skidmore, E., 2001.** On farm evaluation of field scale soil losses by wind erosion under traditional management in the Sahel. Soil erosion research for the 21st century, Honolulu, 3-5 janvier 2001, pp. 494–497.
- Biielders, C.L., Rajot, J.R., Amadou, M., 2002.** Transport of soil and nutrients by wind in bush fallow land and traditionally managed cultivated fields in the Sahel. Geoderma, 109 : 19–39.
- Biielders, C.L., Rajot, J.R., Karlheinz, M., 2004.** L'érosion éolienne dans le Sahel nigérien : influence des pratiques culturales actuelles et méthodes de lutte. Sécheresse, 15: 19–32.
- Bisal, F., & Nielsen, K., 1962.** Movement of soil in saltation. Canadian journal of soil science, 42:143-146.
- Blumberg, D.G., and Greeley, R., 1993.** Field studies of aerodynamic roughness length. Journal of Arid Environments, 25(1): 39-48.
- BNEDER., 2014.** Analyse de l'aptitude à la culture de l'olivier des sols de la région de Laghouat. 202 p.
- Bonneau, M., et Souchier, B., 1979.** Pédologie. 2 : Constituants et propriétés du Sol. Masson Ed. Paris, 460 p.
- Bouchetata, T., et Bouchetata, A., 2011.** Dégradation des écosystèmes steppiques et stratégie de développement durable. Mise au point méthodologique appliquée à la Wilaya de Nâama (Algérie). Développement durable et territoires. pp : 1-17.
Available : <http://developpementdurable.revues.org/1339>.
- Boudad, L., Kabiri, L., Farkh, S., Falguères, C., Rousseau, L., Beauchamp, J., 2003.** Datation par la méthode U/Th d'un travertin quaternaire du Sud- Est Marocain: Implications paléo climatiques pendant le Pléistocène moyen et supérieur. Comptes Rendus Académie Sciences. Geoscience, 335 : 469–478.
- Boughani, A., et Hirche, A., 1991.** Rapport phytoécologique de la wilaya de Biskra. URBT.
- Boughani, A., 1995.** Contribution à l'étude de la flore et des formations végétales au Sud des monts du Zab (Ouled Djellal, wilaya de Biskra). Thèse magister, USTHB, Alger, 226p.
- Boukhobza, M., 1982.** L'agropastoralisme traditionnel en Algérie, de l'ordre tribal au désordre colonial. Alger, Algérie, Office de Publication Universitaire (OPU), 458 p.
- Boulaine, J., 1957.** Étude des sols des plaines du Chélif, Ministère de l'Algérie, Direction de l'Hydraulique et de l'Équipement rural, Service des Études scientifiques, Birmandreis (Alger), 1957.
- Boulaine, J., 1961.** Sur le rôle de la végétation dans la formation des carapaces calcaires méditerranéennes. Travaux de l'IR Saharien 2568-2570.
- Boumedienne, M.A.M., 2014.** Analyse de la sensibilité à la dégradation par érosion éolienne des terres du périmètre agricole de Mokrane par utilisation du modèle RWEQ. Mem Magister, Université de Laghouat, 123p.
- Bouzenoune, A., 1984.** Etude phytogéographique et phytosociologique des groupements végétaux du Sud oranais. (Wilaya de Saida). Thèse doctorat USTHB, Alger, 225 p.
- Buerkert, A., Lamers, J.P.A., 1999.** Soil erosion and deposition effects on surface characteristics and pearl millet growth in the West African Sahel. Plant and Soil 215 : 239-53.
- Buschiazzo, D.E., and Zobeck T.M., 2008.** Validation of WEQ, RWEQ and WEPS wind erosion for different arable land management systems in the Argentinean Pampas, Earth Surface Processes and Landforms 33: 1839–1850.
- Butterfield, G. R., 1991.** Grain transport in steady and unsteady turbulent airflows. Acta Mechanica Suppl. 1:97-122.
- Capot-Rey., 1939.** Pays du Mzab et région des Dayas Etude sur le relief de la dorsale saharienne, Annales de géographie 1939 XLVIII pp 41-62.
- Capot-Rey, R., 1946.** Études récentes sur le climat de l'Afrique du nord et du Sahara. In: Annales

de Géographie, t. 55,n°297. pp. 39-48.

- Casenave, A., and Valentin, C., 1989.** Les états de Surface de la Zone Sahélienne. Influence sur l'infiltration. ORSTOM, Collection "Didactiques". 230 pp.
- Chehma, A., 2004.** Étude floristique et nutritive des parcours camelins du Sahara septentrional algérien : cas des régions d'Ouargla et Ghardaïa. Thèse Doctorat. Université Baji Mokhtar, Annaba. 138 p.
- Chepil, W.S., 1945.** "Dynamics of Wind Erosion **11**: Initiation of Soil Movement,". *Soil Sci.*, Vol. 60, Nov. 1945, pp. 397-411.
- Chepil, W.S., 1955a.** Factors that influence clod structure and erodibility of soil by wind: V. Organic matter at various stages of decomposition. *Soil Sci.*, 80: 413-421.
- Chepil, W.S., 1955b.** Factors that influence clod structure and erodibility of soil by wind: IV. Sand, silt and clay, *Soil Sci.*, 80:155-162.
- Chepil, W.S., 1956.** Influence of moisture on erodibility of soil by wind, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 20: 288-292.
- Chepil, W.S., 1962.** A compact rotary sieve and the importance of dry sieving in physical soil analysis. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 26(1):p 4-6.
- Chepil, W.S. and Woodruff, N.P., 1963.** The physics of wind erosion and its control, *Advances in Agronomy*, 15: 211-302.
- Chepil, W.S, Siddoway, F.H., Armbrut, D.V., 1964.** In the Great Plains Prevailing Wind Erosion Direction. *Journal of Soil and Water conservation* 19, N°2, March-April, 67-70.
- Chettih, M., 2007.** Analyse fonctionnelle de quelques systèmes aquifères de l'Atlas Saharien Central. Thèse de Doctorat, U S T Houari Boumedienne. 312 p
- Chevrier, A., et Barbier, S., 2002.** Performances économiques et environnementales des techniques agricoles de conservation des sols. Création d'un référentiel et premiers résultats. Institut National de la Recherche Agronomique de Versailles-Grignon.
- CNUED., 1992.** Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement Rio de Janeiro 3-14-Juin. Annexe I. 4p.
- CNUDD., 2012.** Rapport Rio+. **Rio** de Janeiro, au Brésil, du **20** au **22** juin.
- Cooke, R., Warren, A., Goudie, A., 1996.** Desert geomorphology, UCL press, London 526 p.
- Côte, M., 2002.** Des oasis aux zones de mise en valeur : l'étonnant renouveau de l'agriculture saharienne. *Revue Méditerranée*, Tome 99, 3-4-2002. pp. 5-14.
DOI : [10.3406/medit.2002.3253](https://doi.org/10.3406/medit.2002.3253).
- Cornet, A., 1996.** Désertification et projets de lutte. Réflexions préliminaires. Rapport au CST Du FEM .Paris.17 p.
- Coudé-Gaussen, G. & Rognon, P., 1995.** Désertification et aménagement au Maghreb. Vol 8. Editions L'Harmattan.
- CRBT., 1978.** Rapport phytoécologique et pastoral sur les hautes plaines steppiques de la wilaya de Saida. CRBT, Alger. 256 p. + ann + carte.
- CSFD., 2002.** La lutte contre la désertification dans les projets de développement. Document collectif sous la direction de Jouve Philippe -158p.
- Daget, P., et Poissonet, J., 1971.** Une méthode d'analyse phycologiques des prairies , *Ann. Agron.*, 22, 1, 5-41.
- Daget, P., 1974.** Les prairies du Cantal, Valeur bromatologique, *Rev, Haute-Auvergne*, Avril-Juin : 35 p.
- Daget, P., 1976.** Répartition des présences dans une série d'unités d'échantillonnage. Application à l'analyse de l'homogénéité. *Naturalia monspeliensia, sér. Bot.*, 26, 95-108.
- Daget, P., 1980.** Le nombre de diversité de Hill, un concept unificateur dans la théorie de la diversité écologique, *Acta Oecol. Oecol. Gén.*, 1, 1 : 51-70.
- Daget, P., & Poissonet, J., 1997.** Biodiversité et végétation pastorale, *Rev. Elev. Med. Vét. Pays trop*, 50, 2 : 141-144.
- Daget, P., 2002.** Entre le pastoraliste et le pasteur : l'enquête pastorale, *pastum*, 63 : 11-22.

- Daget, P., et Poissonet, J., 2010.** Prairies et pâturages, méthodes d'études et interprétations. Association Française de pastoralisme, CNRS, CIRAD ,955p
- Dajoz, R., 1970.** Précis d'écologie.Ed. Dunod, Paris, 357 p.
- Dajoz, R., 1982.** Précis d'écologie. Ed. Gautier- Villars, Paris, 503 p.
- Dajoz, R., 2006.** Précis d'écologie. Ed. Dunod, Paris, 631 p.
- Davies, W., 1948.** Grassland as a biotic community, J. Brit. Grassl. Soc., 3, 3 :171-176.
- Delpech, R., 1960.** Critère de jugement de la valeur agronomique des prairies, Fourrages, 4 : 83-98.
- Delpech, R., 1962.** Comment améliorer les prairies permanentes, Bull. CETA, Etude 726, 8p.
- De Oro., L.A., Buschiazzo, D.E., 2009.** Threshold wind velocity as an index of soil susceptibility to wind erosion under variable climatic conditions. Land Degradation & Development, 20 : 14-21.
- Djebaili, S., 1978.** Recherches phyto-sociologiques et écologiques sur la végétation des Hautes Plaines steppiques et de l'Atlas saharien algériens. Thèse d'Etat: Sciences. Univ. Languedoc. Montpellier (France). 220 p.
- Djebaili, S., 1984.** Steppe Algérienne phytosociologie et écologie. OPU Alger, 177p.
- Djebaili S., Djellouli Y and Daget P. 1989.** Les steppes pâturées des Hauts Plateaux algériens. Fourrages. 120: 393-400.
- Djelouli, Y., 1990.** Flores et climats en Algérie septentrionales. Déterminismes climatiques de la répartition des plantes. Thèse doctorat. USTHB, Alger. 210 p.
- Djili, K., Daoud, Y., Ayache, N., 1999.** Analyse de la distribution verticale et spatiale du calcaire dans les sols de l'Algérie septentrionale. Etudes et gestions des sols.6, 3- P 201 : 213.
- DGF., 2004.** Direction Générale des Forêts, Organe National de Coordination sur la lutte contre la désertification : Rapport national de l'Algérie sur la mise en œuvre de la Convention de Lutte Contre la Désertification, Septembre 2004.
- Dong, Z., and Qian, G., 2007.** Characterizing the height profile of the flux of wind-eroded sediment. Environ Geol, 835-845.
- Dregne, H. E., 1983.** Desertification of arid lands. Harwood Academic Publishers, New York.
- Dregne, H. E.,1990.** Erosion and soil productivity in Africa. Journal of Soil and Water Conservation, 45: 431 - 436.
- Dregne, H.E., Kassa, H., and Rzanov, B., 1991.** A new assessment of the world status of desertification and implementation of the United Nations Plan to combat desertification. In Desertification Control Bulletin, 20: 6 -18.
- Dregne, H.E., 2002.** Land Degradation in the Drylands. Arid Land Research and Management, 16: p 99 -132.
- DSA L., 2010.** Direction des services agricoles wilaya de Laghouat. Statistiques.110 p.
- Dubief J., 1952.** Le vent et le déplacement du sable au Sahara, Travaux de l'institut de Recherches Sahariennes. t. VIII, p 123-162.
- Dubost, D., 1986.** Nouvelles perspectives agricoles du Sahara algérien. Revue de l'Occident musulman et de la Méditerranée, N°41-42, 1986. pp. 339-356.
DOI : [10.3406/remmm.1986.2466](https://doi.org/10.3406/remmm.1986.2466).
- Dubost, D., 2002.** Ecologie, aménagement et développement agricole des oasis algériennes- Edition CRSTRA, 423 p.
- Duchaufour, P., 2001.** Introduction à la science du sol, 6^e Edition. Dunod, 331 pp.
- Durand J.H., 1954.** Les sols d'Algérie. S.C.H., S.E.S., pédologie n°2, 244 p.
- Duthil, P., 1962.** Etude du bilan de l'eau des sols en cases lysimétriques sur les hauts plateaux. Alger DHER 4 p.
- Duvigneau, G., 1987.** L'évolution de la sédentarisation dans les Hautes Plaines de l'ouest algérien. In: Revue de l'Occident musulman et de la Méditerranée, N°45, 1987. pp. 80-93.
DOI : [10.3406/remmm.1987.2172](https://doi.org/10.3406/remmm.1987.2172).
- Dyunin, A.K., 1954.** Trudy Transportino Energicheskogo Instituta ('solid flux of snow-bearing air flow'). National Research Council of Canada, Technical Translation 1102-63, 4, 71-88.

- El Zerey, W., Bouiadjra, S.B., Benslimane, M., et Mederbal, K., 2009** .L'écosystème steppique face à la désertification : cas de la région d'El Bayadh, Algérie. Vertigo-Vol : 19 Numéro 2.
- Emberger, J., 1960.** Esquisse géologique de la partie orientale des monts d'Ouled Nails. Publication du service de la carte géologique de l'Algérie. Bulletin 27.Nouvelle série.399p.
- Erroux, J., 2003.** Jachère, Encyclopédie berbère, 25 Iseq qemâren – Juba, Aix-en- Provence, Edi sud, 2003, p. 3844-3851.
- Escadafal, R., 1989.** Caractérisation de la surface des sols arides par observations de terrain et par télédétection. Applications : exemple de la région de Tataouine (Tunisie). Etudes et Thèses. Editions ORSTOM, Paris.
- Escadafal, R., 1994.** Soil spectral properties and their relationships with environmental parameters. Examples from arid regions. In : Hill J. & Mégier J. (Eds), Imaging spectrometry a tool for environmental observations, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 71-87.
- Estorges, P., 1961.** Morphologie du plateau Arba. Travaux de l'IRS XX : 29-77.
- Estorges, P., 1965.** La bordure saharienne du Djebel Amour. Travaux de l'IRS, XXIV : 31-46.
- Estorges, P., Aumassip, G., Dagorne, A., 1969.** El Haouita, un exemple de remblaiement finiwurmien. Lybica, t . XVII, pp : 53-92
- FAO- UNESCO., 2003.** Digital Soil Map of the world and derived soil properties on CD-Rom. FAO, Rome. Available from <http://www.fao.org/ag/agl/agll/dsmw.htm>
- FAO., 2005.** Utilisation des engrais par culture en Algérie. Rome 2005-31p.
- FAO., 2011.** Présentation du projet SOLAW. Le 28 Novembre 2011.
[www.fao.org/nr/solawsol-climat-se.](http://www.fao.org/nr/solawsol-climat-se) [www.fao.org/news/story/fr/item/95178/icode/-39K.](http://www.fao.org/news/story/fr/item/95178/icode/-39K)
- FAO., 2014.** Des plans d'action mondiaux pour freiner la dégradation des terres. Le 24 Juillet 2014. [http://www.fao.org/news/story/fr/item/239345/icode/.](http://www.fao.org/news/story/fr/item/239345/icode/)
- FEM., 2010.** Rapport à l'Assemblée du FEM Nouvelles données scientifiques et nouvelles opportunités pour FEM-5 et au-delà. Rapport du STAP à la Quatrième Assemblée du FEM, Uruguay, Mai 2010. 27 P.
- Fikri Benbrahim, K., Ismaili, M., Fikri Benbrahim, S., and Tribak, A., 2004.** Problèmes de dégradation de l'environnement par la désertification et la déforestation : impact du phénomène au Maroc. Sécheresse N° 4, vol. 15, 307-320.
- Floret, C., et Pontanier, R., 1982.** L'aridité en Tunisie présaharienne. Climat, sol, végétation et aménagement. Travaux et documents de l'ORSTOM n°150, Paris. p. 544.
- Fryrear, D.W., 1986.** A field dust sampler. Journal of Soil and Water Conservation 41, 117–120.
- Fryrear, D.W., Stout, J.E., Hagen, L.J., Vories, E.D., 1991.** Erosion field measurement and analysis. Transactions of the ASAE 34, 155–160.
- Fryrear, D.W., Saleh, A., 1993.** Field wind erosion: vertical distribution. Soil Sci. 155, 294–300.
- Fryrear D.W, Saleh A. et Bilbro J. D., 1998 a.** A single event wind erosion model. Transaction of the American Society of Agricultural Engineers, , vol 41(5): p1369-1374
- Fryrear, D.W., Sutherland, P.L., Davis,G., Dollard, H and M., 1999.** Wind Erosion Estimates with RWEQ and WEQ.10th Conservation Organization Meeting held May 24-29,1999.pp 760-765.
- Fryrear, D.W., Bilbro, J.D., Saleh,A., Schomberg, H.M., Stout, J.E., Zobeck, T.M.,2000,** RWEQ : Improved Wind Erosion Technology, Journal of soil and water conservation, Second Quarter, 183-189.
- Gabber, E.I., 2002.** Land Degradation Problems and their Environmental and Economic Impacts. National Symposium on Land Degradation in Egypt and Africa: Causes, Environment Hazards and Conservation Techniques. University of Cairo, March 23-24, 2002, pp. 1-8, Egypt.
- Gausson, H., 1957.** Les climats biologiques et leur classification, In: Annales de Géographie. 1957, t. 66, n°355. pp. 193-220.
- Ghanem, M., 2003.** La désertification au Maroc-Quelle stratégie de lutte ? 2nd FIG Regional Conference Marrakech, Morocco, December 2-5.
- Gilette, D.A., et Walker, T.R.,1977.** Characteristics of air-borne particles produced by wind erosionof sandy soil, High plains of West Texas. Soil Science 123, 97-110.

- Goffin, N., 2009.** Impact de la mise en culture sur l'érosion éolienne à Laghouat, Algérie, mémoire de Master, UCL(Belgique). 90 Pages.
- Gomes, L., Arrué,J.L., López, M.V., Sterk, G., Richard,D., Gracia, R., Sabre, M., Gaudichet, A., and Frangi, J.P.,2003.** Wind erosion in a semiarid agricultural area of Spain: The WELSONS project, *Catena*, 52, 235-256.
- Gounot M., 1969.** Méthodes d'étude quantitative de la végétation. Masson éd., Paris, 314 p.
- Greeley, R., Blumberg, D. G. and Williams, S. H. 1996.** Field measurements of the flux and speed of wind-blown sand, *Sedimentology*, 43: 41-52.
- Guettouche, M. S., et Guendouz, M., 2007.** Modélisation et évaluation de l'érosion éolienne potentielle des sols cultivables dans le Hodna (Nord-Est algérien), *Sècheresse* 2007 ; 18(4) ; 254-263.
- Hadeid, M., 2008.** Approche anthropique du phénomène de désertification dans un espace steppique : le cas des hautes plaines occidentales algériennes", *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement* Volume 8 n° 1.
[Online] Available : <http://vertigo.revues.org/5368>.
- Hagen, L.J., and Lyles, L., 1988.** Estimating small grain equivalents of schrub dominated rangeland for wind erosion control, *Trans. ASAE*, 31 (3), 769-775.
- Halitim, A., 1988.** Sols des régions arides. OPU, Alger, 384p.
- Hannachi, A., 1981.** Relation entre aquifères superficiels et profonds : Hydrogéologie de la vallée d'oued M'zi à l'Est de Laghouat. Thèse de Doctorat, Université de Grenoble, 121p.
- HCDS., 2010.** Haut commissariat au développement de la steppe, Djelfa. Rapports situation de la steppe. Département Pédologie, 12 p.
- Hellal, B., Benseddik, B., Ayad, N., et Benhassaini, H., 2004.** La régénération dans la steppe du sud oranais en Algérie occidentale. *Sécheresse* (Paris), vol. 15, no 2 : 173- 179.
- Herricka, J.E., Schuman, G.E., Rangoa, A., 2006.** Monitoring ecological processes for restoration projects. *Journal for Nature Conservation* 14: 161—171.
- Hirche, A., Boughani, A., Nedjraoui, D., 1999.** About grassland quality assessment in arid areas. In : Etienne M. (ed.). *Dynamics and sustainability of Mediterranean pastoral systems*. Zaragoza : CIHEAM, 1999. p. 193-197. N° 39.
<http://ressources.ciheam.org/orn/pdf/c39/99600073.pdf>.
- Hoffmann, C., Funk, R., Reiche, M., and Li, Y., 2011.** Assessment of extreme wind erosion and its impacts in Inner Mongolia, China. *Aeolian Research*, 3: 343–351.
- Hourizi, R., 1995.** Contribution à l'étude d'un écosystème à *Lygeum spartum* L. dans le Sud Oranais : diagnostic phytoécologique et cartographique. Thèse magister, faculté des sciences biologiques, U ST Houari Boumeddiene, Alger.
- Houyou, Z., Biolders, C. L., Benhorma, H.A., Dellal, A., Boutmedjet, A.,2014.** Evidence of strong land degradation by wind erosion as a result of rainfed cropping in the Algerian steppe: a case study at Laghouat. *Land Degradation & Development*. DOI: 10.1002/ldr.2295.
- Hupy Joseph, P., 2004.** Influence of vegetation cover and crust type on wind-blown sediment in a semi-arid climate. *Journal of Arid Environments*, 58 : 167–179.
- I.A.P., 1972.** Notice explicative de la carte géologique à 1/200.000 de Laghouat. Institut du pétrole Algérien. Rapport collectif dirigé par le professeur J.Guillemot. 110 p.
- IFPRI., 2009.** Agro environmental Transformation in the Sahel. 30 p.
- Ikazaki, K., Shinjo, H., Tanaka,U.,Tobita,S., Funakawa,S.,Kosaki.,Kosaki,T, 2010.** Performance of anAeolian Materials Sampler for determination of Amount Coarse Organic matter Transported During Wind Erosion Events in The Sahel,West Africa. *Pedologist*, 126-134.
- Ikazaki, K., Shinjo, H., Tanaka, U., Tobita, S., Funakawa, S., & Kosaki, T., .2011.** "Fallow Band System," a land management practice for controlling desertification and improving crop production in the Sahel, West Africa. 1. Effectiveness in desertification control and soil fertility improvement, *Soil Science and Plant Nutrition*, 57:4, 573-586.

DOI: 10.1080/00380768.2011.593155

- Ikazaki, K., Shinjo,H., Tanaka,U., Tobita,S., Funakawa,S., Iwai,K., and Kozaki,T.,2012.** Soil and Nutrient Loss from a Cultivated Field During Wind Erosion Events in the Sahel, West Africa. *Pedologist* , 355-363.
- Isnard,H., 1952.**Le mécanisme du climat de l'ouest africain. *L'information géographique*. Volume 16 n°3, 1952. pp. 98-100.doi : 10.3406/ in geo.1952.1159.
- Jager, J.C., & Looman, C.W.N., 1995.** Data collection. In : R.H.. Jongman, C.J.F. ter Braak & O.F.R. van Tongeren (editors); *Data Analysis in Community and Landscape Ecology*, Cambridge University Press, Cambridge, p. 10-28.
- Jauffret, S., 2001.** Validation et comparaison de divers indicateurs des changements à long terme dans les écosystèmes méditerranéens arides : Application au suivi de la désertification dans le Sud tunisien, PhD, Thèse de doctorat, Université Aix-Marseille III, 365 pp.
- Kaabache, M., 1990.** Les groupements végétaux de la region de Boussada Algérie. Thèse de Doctorat. Université Paris Sud 134p.
- Kadi Hanifi, H., 1998.** L'alfa en Algérie. Syntaxonomie, relations milieu- végétation, dynamique et perspectives d'avenir. Thèse Doctorat. USTHB. Alger. 270 p.
- Kardous, M., 2005.** Quantification de l'érosion éolienne dans les zones arides. Tunisiennes : approche expérimentale et modélisation. Thèse de doctorat en sciences, Université Paris 12, 298p.
- Katyal, J.C., and Vlek, P.L.G., 2000.**Desertification: concept, causes and amelioration, ZEF, Discussion Papers on Development Policy 33, Bonn, 65 pp.
- Kawamura, R., 1951.** Study on sand movement by wind, Report 5, Institute of Science and Technology, Tokyo, 95-112.
- Kay, B.D., and Angers, D.A., 1999.** Soil structure, In: 'Handbook of Soil Science' (Ed ME Sumner), pp A-229-276. CRC Press, Boca Raton USA.
- Khaldi, A., 2014.** La gestion non durable de la steppe algérienne.
<http://vertigo.revues.org/15152>
- Khaldoun, A., 2000.** Evolution technologique et pastoralisme dans la steppe Algérienne. Le cas du camion Gak en hautes plaines occidentales. *Option Méditerranéennes*, série A, N° 39 : 121-127.
- Khatteli, H., 1983.** Contribution à l'étude de l'érosion éolienne dans la Djeffara tunisienne (sa dynamique dans les terrains, cultures et parcours). *Bulletin technique de l'I.R.A.* N°3, Médenine, Tunisie.
- Khatelli, H., and Gabriels, D., 1998.** A study on the dynamics of sand dunes in Tunisia: Mobile barchans move in the direction of the Sahara. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 12: 47-54.
- Killian, C., 1948.** Conditions édaphiques et réaction des plantes indicatrices de la région alfatière. *Ann. Agro.*, 1: 4-27.
- Kuhlman, H., 1958.** Quantitative measurements of aeolian sand transport, *Geografisk Tidsskrift*, 57, 51-74.
- Labani, A., Bouchtata, T., Benabdeli, K., Adda-Hanifi, N.N., Terras, M., 2005.** Contribución al estudio de los procesos de desertificación de la estepa argelina: el caso de la región de Nâama (SO de Argelia). *Ecosistemas*, 14, 3: 67-85.
- Labiadh, M., Bergametti, G., Kardous, M., Perrier, S., Grand, N., Attoui, B., Sekrafi, S., Marticorena, B., 2013.** Soil erosion by wind over tilled surfaces in South Tunisia. *Geoderma*, 202-203 : 8-17.
- Lacoste, A., 1975.**La végétation de l'étage subalpin du bassin supérieur de la Tinée. Application de l'analyse multidimensionnelle aux données floristiques. *Phytocoenologia*, 3 (1) : 83-122.
- Lacoste, A., et Salanon, R., 2001.** Elément de biogéographie et d'écologie. Ed Nathan 312p.
- Lacoste, A., et Salanon, R., 2006.** Eléments de biogéographie et d'écologie. Une compréhension de la biosphère par l'analyse de composante majeures des écosystèmes. 2^{ème} édition. Armand Colin, 318 p.
- Lahmar, R., Ruellan, A., 2007.** Dégradation des sols et stratégies coopératives en Méditerranée : la pression sur les ressources naturelles et les stratégies de développement durable. *Cahiers Agricultures*, 16: 318-323.

- Lal, R., 2002.** Carbon sequestration in dryland ecosystems of West Asia and North Africa. *Land Degradation & Development*. Vol 13, Issue 1, p 45–59, January/February 2002.
- Lammouroux, M., 1968.** Les sols bruns méditerranéens et les sols rouges partiellement brunifiés du Liban. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. VI, no 1 : 63-91.
- Lancaster, N., Baas, A., 1998.** Influence of vegetation cover on sand transport by wind: Field studies at Owens Lake, California. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23(1): 69-82.
- Lancaster, N., 2004.** Relation between aerodynamic and surface roughness in a hyper arid cold desert: Mcmordo Dry Valleys Antarctica. *Earth Surface Process and Landforms*, 29: 853-867.
- Leenders, J.K., Boxel, J.H., Sterk, G., 2005a.** Wind forces and related saltation transport. *Geomorphology*, 71:357-372.
- Leenders, J.K., 2006.** Wind Erosion Control with Scattered Vegetation in the Sahelian Zone of Burkina Faso. *Tropical Resource Management Papers. Documents sur la Gestion des Ressources Tropicales*, 184p
- Leenders, J.K., Van Boxel, J.H., Sterk, G., 2007.** The Effect of Single Vegetation Elements on Wind Speed and Sediment Transport in the Sahelian Zone of Burkina Faso. *Earth Surf Process Landforms*, 32:1454–1474.
- Leenders, J.K., Sterk, G., and Van Boxel, J.H., 2011.** Modelling wind-blown sediment transport around single vegetation elements. *Earth Surface Processes and Land forms. Earth Surf Process Landforms* 36: 1218–1229.
- Le Floc'h, H.N., 2008.** Guide méthodologique pour l'étude et le suivi de la flore et de la végétation. Ed. Roselte /OSS. , Montpellier ,174 P.
- Le Houérou, H.N., 1991.** La Méditerranée en l'an 2050 : Impacts respectifs d'une éventuelle Évolution climatique et de la démographie sur la végétation, les écosystèmes et l'utilisation des terres. Etude prospective. *La Météorologie, VII Série*, 36: 4–37.
- Le Houérou, H.N., 1995.** Dégénération, régénération et mise en valeur des terres sèches d'Afrique du Nord. Coll. « L'homme peut-il faire ce qu'il a défait ? » Colloque et Congrès. *Sciences et changements planétaires. ORSTOM, AUF. Tunis*, 65- 102.
- Le Houérou, H.N., 1995.** Bioclimatologie et biogéographie des steppes arides du Nord de l'Afrique, *Options Méditerranéennes, B10*, 396 pp.
- Le Houérou, H.N., 1993.** Evolution climatique et désertisation, 639-668. In *Les climats subtropicaux et leur évolution*, André, J.C., J.L. Fellous et A. Podaire, (Eds.), CNES Toulouse 704 pp.
- Le Houérou, H.N., 1997.** Biodiversité végétale et ressources génétiques en Afrique. *Sécheresse (Paris)*, vol. 8, No 2:117-122.
- Lettau, K., and Lettau, H.H., 1978.** Experimental and micro-meteorological field studies of dune migration. In *Exploring the World's Driest Climate*, Lettau, H.H. and K. Lettau, University of Wisconsin-Madison, Institute for Environmental Studies, IES Report 101: 110-147.
- Li, J., Okin, S.G., Alvarez, L., Epstein, H., 2007 .** Quantitative effects of vegetation cover on wind erosion and soil nutrient loss in a desert grassland of southern New Mexico, USA. *Biogeochemistry*, 85: 317–332.
- Liu, L.Y., Skidmore, E., Hasi, E., Wagner, L., Tatarko., 2005.** Dune sand transport as influenced by wind direction and frequencies in the Ordos Plateau, China. *Geomorphology*, 67 : 283-297.
- Long, G., Le Floc'h, E., Pontanier R., Debussche, G., & Lacaze, B., 1978.** Contribution à l'analyse écologique des zones arides de Tunisie avec l'aide des données de la télédétection spatiale. Expérience ARZOTU, rapport final 1975-1978. CEPE/CNRS Montpellier, CNES, INRAT. Tunis et ORSTOM – Paris, 222 p.
- Logie, M., 1982.** Influence of roughness elements and soil moisture on the resistance of sand to wind erosion. *See Yaalon*, 161-173.
- Lopez, F et Garcia, M .1998.** Open channel flow through simulated vegetation: Suspended sediment transport modeling. *Water Resources Research*, Vol 34, Issue 9: 2341–2352.

- Lynch, J.M., et Bragg, E., 1985.** Microorganismes and soil aggregate stability. *Adv soil science*, 2: 133-171.
- Lyles, L., and Krauss., 1971.** Threshold velocities and initial particle motion as influence by air turbulence. *American Society of Agricultural Engineering, Transactions*, 14: 563-572.
- Lyles, L., 1977.** Wind Erosion: Process and effect on soil Productivity. *Transactions of the ASAE* Vol 20, N°5: 880- 884.
- Lyles, L., Hagen, L.F., and. Skidmore, E.L., 1979.** Theory and principles of wind erosion. In *Wind as a geological process on Earth, Mars, Venus and Titan*, Greeley and Iversen, 1985, unpublished manuscript.
- MADR. 2006.** Direction des statistiques agricoles et systèmes d'information. Rapport sur la situation du secteur agricole. Alger. 77 pp.
- Maegley, W.J., 1976.** Saltation and Martian sandstorms, *Rev. Geophys. Space Phys.*, 14: 135-142.
- Mahyou, H., Tychon, B., Balaghi, R., Mimouni, J., & Paul, R., 2010.** Désertification des parcours arides au Maroc. *Tropicultura*, 28, 2 : 107-114.
- Mainguet, M., Chemin, M.C., 1978.** Localisation d'une unité écologique expérimentale dans la région de Maradi Niger : Précipitations et vents dans le Sahel de la république du Niger et étude des variations dues une crise climatique (1968-1973). Rapport 4, ACC-Lutte contre les effets de l'aridité.
- Mainguet, M., 1984.** Le vent, mécanisme d'érosion, de dégradation, de désertification, T.I.G.R., 59-60, 131-135.
- Mainguet, M., 1991.** Desertification : natural background and human mismanagement. Springer-verlag. Springer series in physical environment. 9, 306 p.
- Mainguet, M., 1994.** Désertification : Quels sont les vrais problèmes ? *L'information géographique*, 58 : 58-62.
- Maire, R., 1926.** Principaux groupements végétaux d'Algérie. Alger, MARA, 12 p.
- Marticorena, B., Bergametti, G., Dale, G., Belnap., 1997.** Factors controlling threshold friction velocity in semi arid and arid areas of the united States. *Journal of Geophysical Research* Vol 22, N°D19, 23: 277-287.
- MATE., 2006.** Ministère de l'Aménagement du Territoire ET de l'Environnement: Plan National d'Action pour l'Environnement et le Développement Durable (PNAE-DD) Janvier 2006.
- Mathieu, C., & Pielain, F., 2003.** Analyses chimiques des sols : Méthodes choisies. Tec et Doc 328p.
- Melzi, S., 1990.** Evaluation du processus de la désertification dans une région présaharienne du sud Algérois. *Biocénoses* 5 (1.2) : 85-102.
- Melzi, S., 1993.** Évolution de la végétation et du milieu dans la région présaharienne des steppes algériennes. *Sécheresse*, 4, 2 : 113-116.
- Mendez, M.J., Funk, R., Buschiazzo, D.E., 2011.** Field wind erosion measurements with Big Spring Number Eight (BSNE) and Modified Wilson and Cook (MWAC) samplers. *Geomorphology* 129, 43-48.
- Meur-Férec, C., Ruz, M.H., 2002.** Transport éoliens réels et théoriques en haut de plage et sommet de dune (Wissant, Pas de Calai, France). *Géomorphologie / relief, processus, environnement*, Octobre-Décembre, Vol8, N°4 321-334.
- Michels, K., Sivakumar, M.V.K., Allison B.E., 1995.** Wind erosion control using crop residue I. Effects on soil flux and soil properties. *Field Crops Research*, Vol 40 (2) 101-110.
- Middleton, N., Thomas, D., 1997.** World Atlas of desertification. 2nd édition, United Nations Environnement Programme 182P.
- Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, 2002.** Plan national d'Actions pour l'Environnement et le Développement Durable (PNAE-DD). Alger, janvier 2002.
- Monjauze, A., 1968.** Répartition et écologie de *Pistacia atlantica* en Algérie, *Bulletin de la Société d'histoire naturelle d'Afrique du Nord*. Tome 56- 2. 128 p.
- Monjauze, A., 1982.** le pays des dayas et *Pistacia atlantica* dans le Sahara algérien. *R.F.F. XXXIV* – 4. P 271-290.

- Monod .T., 1973.** Les grandes divisions chronologiques de l'Afrique. 145 p., 2 pl., Conseil scientifique pour l'Afrique au sud du Sahara, Pub 1, N°24, Londres.
- Mouafeg, J., 1984.** Les migrations internes entre les Wilayets de 1966 à 1977», in Statistique (3), O.N.S., Alger, 36-50.
- Nedjraoui, D., 1981.** Evolution des éléments biogènes et valeurs nutritives dans les haute plaines steppiques de la wilaya de Saïda, Thèse 3 cycle USTHB, Alger, 181 p.
- Nedjraoui, D., 2002.** Evaluation des ressources pastorales des régions steppiques algériennes et définition des indicateurs de dégradation. Options Méditerranéennes : 239-243.
- Nedjraoui, D., 2003.** Profil fourrager. FAO.30 P
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/037842909400094S> - AFF1
- Nedjraoui, D., and Bédrani, S., 2008.** La désertification dans les steppes algériennes : causes, impacts et actions de lutte, Vertigo- la revue électronique en sciences de l'environnement, Volume 8 Numéro 1 | avril 2008, mis en ligne le 01 avril 2008.
- Ni, J.R., Li, Z.S., Mendoza, C, 2002.** Vertical profiles of Aeolian sand mass flux. *Geomorphology* 49, 205- 218.
- Nickling, W.G., 1988.** The initiation of particle movement by wind, *Sedimentology*, 35: 499-511.
- Nickling, W. G., 1994.** Aeolian sediment transport and deposition. In *Sediment transport and depositional processes*, (Eds.), by K. Pye, Blackwell Scientific Publication, Oxford, 293-350.
- Noor, A. M., 2006.** Ecological and species diversity of arid Mediterranean grazing land vegetation. *Journal of arid environments* 66 (2006) 698-715.
- Oades, J. M., 1993.** The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. *Geoderma* 56: 377-400.
- OSS/ROSELT., 2004.** Surveillance environnementale dans les Observatoires du Nord de l'Afrique. Collection ROSELT/OSS. Contribution Technique n°15. Montpellier, XXp.
- OSS., 2008.** The North Western Sahara aquifer system (Algeria, Tunisia, Libya). Joint management of transborder basin water/ Synthesis collection- Tunis- N°1. 48p.
- OSS., 2013.** Vulnérabilité au changement climatique des écosystèmes pastoraux et mesures d'adaptation pour l'amélioration de la productivité de l'élevage en zone désertique. Rapport Projet MENA-DELP-31p.
- Owen, P.R., 1964.** Saltation of uniform grains in air, *Journal. Fluid Mech.*, 20, part 2, 225-242.
- Ozenda, P., 1983.** Flore du Sahara. 2ème Edition. Ed. CNRS, Paris, 622 p.
- Ozenda, P., 2004.** Flore et végétation du Sahara. Paris, édition du Centre National de la recherche scientifique 3ème Ed, 662 p.
- Oussedik, A., Iftène.T., Zegrar, A., 2003.** Réalisation par télédétection de la carte d'Algérie de sensibilité à la désertification. *Science et changements planétaires/Sécheresse* vol 14 N°3, 195-201.
- Ozer, P., 2001.** Les lithométéores en région Sahélienne: un indicateur climatique de la désertification. *Revue internationale d'écologie et de géographie tropical* 24, 1-317.
- Ozer, P., Bodart, C., Tychon, B., 2005.** Analyse climatique de la région de Gouré, Niger Oriental : récentes modifications et impacts environnementaux. *Cybergeo: Revue européenne de géographie* 308, 1-24.
- Pédelaborde, P., et Delannoy, H., 1958.** Recherches sur les types de temps et le mécanisme des pluies en Algérie. In: *Annales de Géographie*. t. 67, n°361. pp. 216. 244.
 DOI : [10.3406/geo.1958.16911](https://doi.org/10.3406/geo.1958.16911).
- Peron, A., 1883.** Description géologique de l'Algérie. P a r i s, G. Masson, Éditeur, 204 P.
- Pouget, M., 1980.** Les relations sol-végétation dans les steppes sud algéroises. Mémoire de Thèse. Travaux et documents de l'ORSTOM n°116. p. 555.
- Perret, R., 1935.** Le climat du Sahara. In: *Annales de Géographie*. 1935, t. 44, n°248. pp. 162-186.
 DOI : [10.3406/geo.1935.10846](https://doi.org/10.3406/geo.1935.10846)
- Priesley, C.H.B., 1959.** *Turbulent Transfer in the Lower Atmosphere*, University of Chicago Press, Chicago, 130 pp.
- Quezel, P., & Santa, S., 1962-1963.** Nouvelle flore de l'Algérie et des régions désertiques méridionales. Tome I & II, CNRS, Paris, France 1165 p.

- Quezel, P., 2000.** Réflexions sur l'évolution de la flore et de la végétation au Maghreb méditerranéen. Ibis Press, Paris. 117 p.
- Radok, U., 1977.** Snow Drift, *J. Glaciol*, 19: 123-139.
- Rajot, J.L., 2001.** Windblown sediment mass budget of Sahelian village land units in Niger. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 5 : 523-531.
- Rajot, J.L., Alfaro, S.C., Gomes, L., Gaudichet A., 2003.** Soil crusting on sandy soils and its influence on wind erosion. *Catena*, 53: 1- 16.
- Rajot, J.L., Karambiri, H., Ribolzi, O., Planchon, O., Thiébaux, J.P., 2009.** Interaction entre érosions hydrique et éolienne sur sols sableux pâturés au Sahel : cas du bassin versant de Katchari au nord du Burkina Faso. *Sécheresse*, 20 : 17-30.
- Ramade, F., 2001.** *Elément d'Ecologie Fondamentale*. Edition Mcgraw-Hill 408p.
- Rapp, A., 1974.** A review of desertification in Africa: Water, vegetation and man. Secretariat of Ecologia. Stokholm. 85p.
- Ravi, S., David, D., Breshears, T.H., D'Odorico, P., 2010.** Land degradation in drylands: Interactions among hydrologic-aolian erosion and vegetation dynamics. *Geomorphology*, 116 : 236 -245.
- Rekik, F., Bentouati, A., et Aidoud, A., 2014.** Evaluation des potentialités fourragères d'un parcours steppique à dominance de *Salsola vermiculata* L. dans l'EST de l'Algérie. *Livestock Research for Rural Development*. Volume 26, Article 231.
<http://www.lrrd.org/lrrd26/12/reki26231.html>.
- Regazzola, T., 1969.** Enquête sur le nomadisme 1968, M.A.R.A., Alger.
- Reynolds, J.F., Smith, D.M.S., Lambin, E.F., 2007.** Global desertification: building a science for dryland development. *Science*, 316 (5826), 847-851.
- Ritter, E., 1902.** Le djebel Amour et les Monts des Ouled Nails. *Bulletin du service de la carte géologique de l'Algérie*. N°3 2ème série .100 p.
- Rognon, P., 1976.** Essai d'interprétation des variations climatiques au Sahara depuis 40.000 ans. *Revue géographie physique et géologie dynamique*, 18 : 251-282.
- Rognon, P., 1987.** Late Quaternary Climatic Reconstruction for the Maghreb (North Africa), *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 58 : 11-34.
- Rognon, P., 1995.** "Désertification et aménagement au Maghreb". *Aménagement et nature*, N° 139 :39-52.
- Roselt/OSS CT1., 2001.** Guide Roselt/OSS pour l'étude et le suivi de la flore et de la végétation, Collection Roselt/OSS, CT n° 1, Tunis, 175 p.
- Sagne, J., 1950.** l'Algérie pastorale: ses origines, sa fonction, son passé, son présent, son avenir, Ed J Sagne, Imp Fontana, 1950, 216 p.
- Salemkour, N., Benchouk, N., Nouasria., D, Kherief.S, Belhamra,M.,2013.** 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 CRSTRA-* p103-114.
- Schonfeldt, H.J., 2003.** Remarks on the definition and estimation of Aeolian erosion threshold friction velocity. *Meteorologische Zeitschrift*, Vol 12, N° 3 : 137-142.
- Seltzer, P., 1946.** Le climat de l'Algérie. Alger, Algérie, Institut de météorologie et physique du globe, 219 p.
- Shao, Y., Raupach, M.R., Findlater, P.A.,1993.** Effect of saltation bombardment on the entrainment of dust by wind, *J. Geophys. Res*, 98: 12719-12726.
- Shao, Y., 2000.** *Physics and Modelling of wind erosion*. Atmospheric and Oceanographic sciences, Library. Kluwer academic publisher 128 p.
- Sharratt,B., and Feng, G., 2009.** Friction velocity and aerodynamic roughness of conventional and undercutter tillage within the Colombia Plateau,USA. *Soiland Tillage Research*, 105:236-241.
- Shi, X.Z., 2004.** Soil database of China and carbon dynamics at regional scale. 15p
- Siddoway, F.H., Chepil, W.S., and Armbrust, D.V., 1965.** Effect of Kind, Amount, and Placement of Residue on Wind Erosion Control', *Transactions of the ASAE*, 8: 327-331.

- Skidmore, E.L., 1965.** Assessing Wind forces : Directions and Relative Magnitudes Soil Science Society Proceedings Vol.29, N°, September-October, 587-590 .
- Skidmore, E. L., Nossaman, N.L.,Woodruff,N.P., 1966.**Wind erosion as influenced by row spacing,row direction and grains Sorghum populations. Soil Science Societe of America proceeding 30, N° 4 , July-August 1966 : 505-509.
- Skidmore, E.L., Hagen, J.L., 1977.** Reducing wind erosion with barriers.Transactions of the Asae, 20: 911-915.
- Skidmore, E.L., 1987.** Wind-erosion Direction Factors as influenced by Field Shape and wind Préponderance. Soil Science Society of America Journal, Vol 51, N°1, January-February ,pp 198-202.
- Slimani, H., Aidoud, A., Rozé,F., 2010.** 30 Years of protection and monitoring of a steppic rangeland undergoing desertification. Journal of arid environment, 74:685-691.
- Soane,B,D., 1990.**The role of organic matter in the soil compatibility the review of some practical aspects. Soil tillage Research, 16 : 179-102.
- Soleilhavoup, F., 2011.** Microformes d'accumulation et d'ablation sur les surfaces désertiques du Sahara. Géomorphologie : relief, processus, environnement, n° 2, p. 173-186.
- Sow, M., Alfaro,S.C.,Rajot,J.L.,Marticorena,B.,2009.**Sise resolved dust emission fluxes measured in Niger during 3 dust storms of the AMMA experiment. Atmos.Chem.Phy, 9: 3881-3891.
- Spaan, W.P., Van den Abeele, G.D., 1991.**Wind borne particle measurements with acoustic sensors. Soil Technology, 4 :51-63.
- Steiner, K. G., 1996.** Causes de la dégradation des sols et approche pour la promotion d'une utilisation durable des sols dans le cadre de la coopération au développement. Rapport GTZ Weikersheim : Margraf.
- Sterk, G., and Raats, P.A.C., 1996.**Comparaison of models Describing the vertical Distribution of Wind-Eroded Sediment.Soil ScienceSociety of America Journal, 60: 232-239.
- Sterk, G., 1997.** Wind erosion in the Sahelian zone of Niger: Processes, models, and control techniques. Thèse, Erosion and Soil et Water Conservation Group, Wageningen Agric. Univ., Wageningen,Pays-Bas 151.
- Sterk, G., and Spaan, W.P., 1997.** Wind erosion control with crop residues in the Sahel. Soil Science Society of America Journal, 61(3), 911-917.
- Stout,J E.,1990.** Wind erosion within a simple field, Trans. ASAE 33 1597-1600.
- Stout, J.E and Zobeck, T.M., 1996.** The Wolfforth field experiment: a wind erosion study. Soil Science, 161: 616-632.
- Stout. J.E and Zobeck, T.M., 1997.** Intermittent saltation. Sedimentology 44,959-970.
- Stout,J,E., 2003.** Seasonal variations of saltation activity on high plains saline playa:yellow lake Texas. Physical Geography 24, 1: 61-76.
- Stout, J.E., 2004.** A method for establishing the critical threshold for aeolian transport in the field. Earth Surface Process and Landforms 29 : 1195-1207.
- Taibi, A.N., 1997.** Le piémont sud du djebel Amour (Atlas saharien, Algérie), apport de la télédétection satellitaire à l'étude d'un milieu en dégradation. Université Denis Diderot, Paris VII, Thèse de Doctorat, 310 p.
- Takeuchi, M., 1980.** Vertical profile and horizontal increase of drift-snow transport, J. Glaciol., 26: 481-492.
- Tidjani, A.D., 2008.** Erosion éolienne dans le Damagram Est (sud-est du Niger) Paramétrisation, quantification et moyens de lutte. Thèse de doctorat s sciences. Université catholique de Louvain, 1-171p.
- Tidjani, A.D., Biolders, C.L., Ambouta, K.J.M., 2009.** Dynamique saisonnière des paramètres déterminant l'érosion éolienne sur les pâturages dunaires du Niger oriental. Geo-Eco-Trop, 33: 39-56.
- Tidjani, A.D., Biolders, C.L., Rosillon, D., Ambouta, K.J.M., 2011.** Uncertainties in plot-scale mass balance measurements using aeolian sediment traps. Soil Science Society of America Journal, 75: 708-718.

- Tisdall, J.M., Oades, J.M., 1982.** Organic matter and water stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*, 33:141-163.
- Touré, A.A., 2011.** Erosion en milieu sableux cultivé au Niger : Dynamique actuelle et récente en liaison avec la pression anthropique et les changements climatiques. Thèse de Doctorat, université de Bourgogne. 224 p.
- Toure, A.A., Rajot, J.L., Garba, Z., Marticorena, B., Petit, C., Sebag, D., 2011.** Impact of very low crop residues cover on wind erosion in the Sahel. *Catena*, 85 : 205–214.
- Touré, A.A., Rajot, J.L., Garba, Z., Guillon, R., Tidjani, A.D., Marticorena, B., Petit, C., Sebag, D., 2013.** Six années de suivi du flux d'érosion éolienne sur un sol sableux cultivé au Sahel : Impact des résidus de cultures, de l'encroustement et gestion des sols. Vol 20, 2: 57-70
- Toy, T.J., Foster, G.R., Renard, K. G., 2002.** *Soil Erosion, Processes, Prediction, Measurement, and Control*. John Wiley & Sons, Inc.
- Tricart, J., 1969.** *Le modèle des régions sèches*. Sedes, Paris, 472 p.
- UNCCD-NAP., 2005.** UN Convention to Combat Desertification – Egyptian National Action Program to combat Desertification. Editors : Hegazzi, A. Afifi, M.Y., El Shorbagy, M.A. Elwan, A.A. and El- Demerdash. S. Desert Research Center, Cairo - Egypt.
- UNCCD., 2009.** *La désertification une synthèse visuelle*. Papport 52P
- UNEP., 2003.** (United Nations Development Programme). *Human Development Report 2003. Millennium Development Goals: A Compact Among Nations to End Human Poverty*. Oxford University Press: Oxford.
- UNEP., 1992.** *World Atlas of Desertification*. Nairobi: UNEP, and London: Edward Arnold. 69 plates.
- USDA- Agricultural Research Service., 2002.** A universal equation for measuring wind erosion, USDA-ARS. 22-69, 22p.
- Valentin, C., 1991.** Surface crusting in two alluvial soils of northern Niger. *Geoderma*, 48: 201-222.
- Valentin, C., and Bresson, L.M., 1992.** Morphology, genesis and classification of surface crusts in loamy and sandy soils. *Geoderma*, 55: 225-245.
- Van Pelt, R.S., Zobeck, T.M., Potter, K.N., Stout, J.E., Popham, T.W., 2004.** Validation of the wind erosion stochastic simulator (WESS) and the revised wind erosion equation (RWEQ) for single events. *Environmental Modelling and Software*, 19: 191-198.
- Visser, S.M., Sterk, G., Snepvangers, J.J.J.C., 2004.** Spatial variation in wind-blown sediment in geomorphic units in northern Burkina Faso using geostatistical mapping. *Geoderma*, 12: 95-107.
- Visser, S.M., Stroosnijder, L., Chardon, W.J., 2005a.** Nutrient losses by wind and water, measurement and modelling, *Catena*, 63: 1-22.
- Visser, S.M., Stroosnijder, L., Chardon, W., 2005c.** Modelling nutrient losses by wind and water erosion. *Catena*, 63: 1-22.
- Von Karman, T., 1934.** Turbulence and skin friction, *J. Aero. Sci*, 1: 1-20.
- Vories, E.D., Fryrear, D.W., 1991.** Vertical distribution of wind eroded soil over a smooth, bare field. *Transactions of American Society of Association Executive* 34:1763-1768.
- Warren, A., and Maizels, J.K., 1977.** Ecological change and desertification. UNCOD. 60p.
- Wassif, M.M., 2002.** "Determination of Wind Erosion Precipitation and the Economic Measures to Combat Desertification in Western Desert Oases". A.R.E.
- Wille, B.B., 1983.** Transportation by wind of granular materials of different grain shapes and densities. *Sedimentology* 30, 669-680.
- Wilson, S.J., and Cooke, R.U., 1980.** Wind erosion. See soil erosion, M.J.M. Kirkby & R.C. Morgan (eds), 217- 252. Chichester, England: John Wiley & Son.
- Woodruff, N.P., Siddoway, F.H., 1965.** A wind erosion equation. *Soil Science Society of America Journal. Proc.* 29: 602-608.
- Woodruff, N. P., Lyles, L., Siddoway, F. H., and Fryrear, D.W., 1972.** 'How to Control Wind Erosion', USDA ARS Agricultural Information Bulletin, 354: 22 pp.

- Yan, Y., Xu, X., Xiaoping, X., Xin, X., Yang, G., Wang, X., Yan, R., Chen, B., 2011.**Effect of vegetation coverage on aeolian dust accumulation in a semiarid steppe of northern China, *Catena* 87 : 351–356
- Zhang, C.L., Zou, X.Y., Cheng, H., Yang, S., Pan, X.H., Liu, Y.Z., Dong, G.R., 2007 .** Engineering measures to control windblown sand in Shiquanhe Town,Tibet. *Journal of Wind Engineering and industrial Aerodynamics* 95:53-70.
- Zhang, Z., and Dong, Z., 2014.** Characteristics of aeolian sediment transport over different land surfaces in northern China. *Soil & Tillage Research* 143: 106-115.
- Zhao, C.X., Zheng, D.W., He, W.Q., 2005.** Vegetation cover changes over time and its effects on resistance to wind erosion. *Acta Phytocologica Sinica* 29: 68-73.
- Zingg, A.W., 1953.** Some characteristics of aeolian sand movementby saltation process. *Edition du Centre National de la Recherche Scientifique* 7 : 197 - 208.
- Zobeck, T.M., and Van Pelt, R. S., 2006.** Wind-inducced dust generation and transport mechanics on a bare agricultural field. *Journal of Hanardous Materials* 132: 26 - 38.

[-http://webworld.unesco.org/water/wwap/wwdr/wwdr3/pdf/12_WWDR3_ch_2.pdf](http://webworld.unesco.org/water/wwap/wwdr/wwdr3/pdf/12_WWDR3_ch_2.pdf)

[-http://www.ifpri.org/sites/default/files/publications/ifpridp00914.pdf.](http://www.ifpri.org/sites/default/files/publications/ifpridp00914.pdf)

Annexes

Tableau 1. Fréquence des espèces, fréquence des éléments de la surface du sol et indices spécifiques des espèces inventoriées au niveau des trois stations de l'espace dunaire.

Station 01			Station 02			Station 03		
E _{si}	F _i	I _{si}	E _{si}	F _i	I _{si}	E _{si}	F _i	I _{si}
<i>Aristida pungens</i>	50	3	<i>Aristida pungens</i>	48	3	<i>Astragalus armatus</i>	104	3
<i>Argyrobium uniflorum</i>	45	/	<i>Plantago albicans</i>	45	7	<i>Launea resedifolia</i>	33	4
<i>Retama retam</i>	118	2	<i>Retama retam</i>	67	1	<i>Echinops spinosus</i>	7	1
<i>Euphorbia guyaniana</i>	35	1	<i>Astragalus cruciatus</i>	31	4	<i>Ifloga spicata</i>	45	1
<i>Helianthemum ellipticum</i>	21	2	<i>Argyrobium uniflorum</i>	6	/	<i>Atactylis serratuloides</i>	26	3
<i>Medicago laciniata</i>	3	4	<i>Launea resedifolia</i>	6	1	<i>Didymus bipinnolus</i>	12	3
<i>Astragalus mareaticus</i>	6	1	<i>Erodium triangulare</i>	6	2	<i>Shismus barbatus</i>	3	4
<i>Launea resedifolia</i>	11	4	<i>Helianthemum ellipticum</i>	4	2	<i>Anacyclis radiatus</i>	27	1
<i>Thymelaea microphylla</i>	30	2	<i>Euphorbia guyaniana</i>	4	2	<i>Thymelaea microphylla</i>	138	2
<i>Astragalus cruciatus</i>	6	1	<i>Thymelaea microphylla</i>	93	2	<i>Peganum harmala</i>	6	1
Eléments grossiers	28		Eléments grossiers	15		<i>Stipa tenacissima</i>	10	2
Sables	550		Sables	613		Eléments grossiers	57	
Croûte	51		Croûte	41		Sables	463	
Litière	50		Litière	44		Croûte	36	
						Litière	33	

E_{si} = Élément de surface inventorié ; F_i = Fréquence ; I_{si} = Indice pastorale spécifique.

**Tableau 2. Fréquence des espèces, fréquence des éléments de la surface du sol et indices spécifiques des espèces inventoriées
Au niveau des trois stations de l'espace inter-dunaire.**

Station 01			Station 02			Station 03		
E _{si}	F _i	I _{si}	E _{si}	F _i	I _{si}	E _{si}	F _i	I _{si}
<i>Aristida pungens</i>	192	3	<i>Aristida pungens</i>	140	1	<i>Astragalus armatus</i>	148	1
<i>Ifloga spicata</i>	14	1	<i>Astragalus mareaticus</i>	5	1	<i>Helianthemum ellipticum</i>	45	2
<i>Retama retam</i>	84	1	<i>Retama retam</i>	16	1	<i>Launea resedifolia</i>	33	1
<i>Euphorbia guyaniana</i>	57	1	<i>Euphorbia guyaniana</i>	33	1	<i>Echinops spinosus</i>	52	1
<i>Helianthemum ellipticum</i>	43	2	<i>Silene arenarioides</i>	34	1	<i>Thymeleae microphylla</i>	92	2
<i>Argyrolobium uniflorum</i>	8	/	<i>Pseudocaria teresifolia</i>	5	2	<i>Malcomia aegyptiana</i>	15	2
<i>Astragalus mareaticus</i>	3	1	<i>Thymeleae microphylla</i>	5	2	<i>Notoceras bicornis</i>	5	1
<i>Thymeleae microphylla</i>	5	2	<i>Astragalus cruciatus</i>	5	1	<i>Plantago ciliata</i>	5	7
<i>Astragalus cruciatus</i>	19	1	Eléments grossiers	5		<i>Trigonella stallata</i>	7	4
Eléments grossiers	16		Sables	460		<i>Euphorbia guyaniana</i>	5	1
Sables	383		Croûte	157		<i>Stipa tenacissima</i>	9	1
Croûte	119		Litière	135		Eléments grossiers	47	
Litière	57					Sables	379	
						Croûte	122	
						Litière	36	

E_{si} = Élément de surface inventorié ; F_i = Fréquence ; I_{si} = Indice pastorale spécifique.

Tableau 3. Analyse de la variance pour le recouvrement par la végétation.

Source	DL	SC	CM	F	P
C1	1	0.00064	0.00064	0.08	0.794
Erreur	4	0.03279	0.00820		
Total	5	0.03343			

Tableau 4 Analyse de variance pour le recouvrement par les éléments grossiers.

Source	DL	SC	CM	F	P
C1	1	0.000171	0.000171	0.36	0.579
Erreur	4	0.001873	0.000468		
Total	5	0.002044			

Tableau 5. Analyse de la variance pour le recouvrement par les sables.

Source	DL	SC	CM	F	P
C1	1	0.02720	0.02720	6.36	0.065
Erreur	4	0.01712	0.00428		
Total	5	0.04432			

Tableau 6. Analyse de la variance pour le recouvrement par la croûte.

Source	DL	SC	CM	F	P
C1	1	0.012150	0.012150	48.15	0.002
Erreur	4	0.001009	0.000252		
Total	5	0.013159			

Tableau 7. Analyse de la variance pour le recouvrement par la litière.

Source	DL	SC	CM	F	P
C1	1	0.00167	0.00167	1.18	0.339
Erreur	4	0.00567	0.00142		
Total	5	0.00734			

Tableau 8. Analyse de la variance pour la productivité pastorale.

Source	DL	SC	CM	F	P
C1	1	86	86	0.29	0.621
Erreur	4	1208	302		
Total	5	1294			

Tableau 9. Analyse de la variance pour la valeur pastorale.

Source	DL	SC	CM	F	P
C1	1	0.99	0.99	0.17	0.701
Erreur	4	23.29	5.82		
Total	5	24.29			

Tableau 10. Analyse de la variance pour la charge pastorale.

Source	DL	SC	CM	F	P
C1	1	1.63	1.63	0.41	0.557
Erreur	4	15.92	3.98		
Total	5	17.55			