الـجمـهوريـــة الجزائـــريـــة الـديمـقراطـية الـشعبيـة
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التـــعليـم العـالـــي والبـحـث العلمـــي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Amar TELIDJI Laghouat
Faculté des Sciences
Département de Biologie

□ـامعة عمـار ثـلـيـجي - الأغواط -
كلية العلو□
قسم البيولو□يا

Mémoire Présenté par: Mohammed Abdelmadjid BOUMEDDIENNE
en vue de l'obtention du diplôme de Magister

Spécialité : Ecologie végétale
Option : Dynamique des écosystèmes et environnement

Thème

Analyse de la sensibilité à la dégradation des terres par érosion éolienne dans la région de Laghouat par utilisation du modèle *RWEQ*

Soutenu publiquement le : / / 2014
Devant le jury :

Mr MEDJELLED A	Maitre de Conférences	Président
Mr BENHORMA H A	Maitre de Conférences A	Encadreur
Melle HOUYOU Z	Maitre Assistant A	Co- encadreur
Mme SOUIDI Z	Maitre de Conférences A	Examinatrice
Mr ADAMOU A.E	Maitre de Conférences B	Examinateur

Année universitaire 2014/2015

Résumé :

La connaissance des potentialités des zones steppiques contribue fortement à leur préservation contre toute forme de dégradation et par conséquent leur développement durable. L'érosion éolienne est un phénomène qui touche de grandes étendues dans la steppe algérienne conduisant parfois à sa dégradation irréversible. Dans la région de Laghouat siège de nos recherches, le vent est actif à longueur d'année, conjugué à des pratiques anthropiques irréfléchies, il est souvent à l'origine de la dégradation des terres. Le modèle RWEQ (Revised Wind Erosion Equation) a été utilisé pour estimer les pertes en terre dans une zone située dans les régions sud steppiques de la wilaya de Laghouat. La zone appelée Mokrane est un passage de transhumance pour des milliers de têtes d'ovins, aussi elle est le siège de défrichements et de céréalicultures en pluviale dont les conséquences sont la mise à nu et l'émiettement des sols favorisant ainsi leur dégradation par le vent. En Automne 2013 et au printemps 2014, le modèle RWEQ a été appliqué dans la zone d'étude pour l'estimation des flux éoliens maximum et des pertes en terre. L'étude de terrain menée par déplacements le long de 20 transects sur lesquels 124 points de mesure ont été relevé. Dans la zone, les aspects physionomiques du milieu montrent cinq unités géomorphologiques. Une station météo (CR 1000) installée dans les lieux a permis l'estimation du facteur du vent dont les valeurs sont respectivement 3,28 et 4,14 pour l'automne et le printemps. Les analyses des sols montrent que la totalité des points de mesure présentent une texture légère ou les sables dominent à plus de 99 %. La fraction erodible a atteint les 99% en automne et est variable entre 80 % et 99 % au printemps. La rugosité du sol mesurée à l'aide d'un rugosimètre à aiguille donne au printemps une hauteur maximale de 2,92 (cm).Les relevés de la couverture végétale présentent un taux maximal de couverture du sol ne dépassant pas les 20.92% mesuré au printemps. Les flux maximum estimés par RWEQ présentent des valeurs variables en fonction des saisons et des unités géomorphologiques oscillant entre 30.87 ($kg.m^{-1}$) et 419.65 ($kg.m^{-1}$), les pertes en terre estimées par RWEQ révèlent une tendance favorable au phénomène de l'érosion éolienne et la dégradation des sols de cette région.

Mots clés : Steppe, Laghouat, érosion éolienne, RWEQ.

Abstract:

Knowledge of the potential of steppe areas contributes significantly to their protection against any form of degradation and therefore their sustainable development. Wind erosion is a phenomenon that affects large areas of the Algerian Steppe sometimes leading its irreversible degradation. In Laghouat seat of our research area, the wind is active throughout the year, combined with careless human practices, is often the causes of land degradation. The RWEQ model (Revised Wind Erosion Equation) was used to estimate soil loss in an area in the southern steppe regions of the wilaya of Laghouat. The area called Mokrane is a pasture way for thousands of head of sheep , it is also the seat of clearing and rainfed cereal cropping whose consequence are the exposed and crumbling soil thus promoting degradation by wind. In autumn 2013 and spring 2014, the RWEQ model was applied in the study area to estimate the maximum wind flows and soil loss. The field study was done by movements along 20 transect in which 124 measurement points were raised. In the area, the physiognomic aspects of the environment show five geomorphologic units. A weather station (CR 1000) installed in places allowed the estimation of Wind Factor whose values are 3.28 and 4.14 respectively for autumn and spring. Soil analyzes show that all measuring points have a slight texture or the sands dominate more than 99%. The erodible part reached 99% in autumn and it is variable between 80% and 99% in spring. Surface roughness measured using a roughness needle gives a maximum height of 2.92 (cm) .The vegetation cover have a maximum rate of soil coverage not exceeding 20.92% measured in the spring. The maximum flux estimated by RWEQ have varying values depending on the season and oscillating between 30.87 geomorphic units (kg m-1) and 419.65 (kg m-1), soil loss estimated by RWEQ show a favorable trend phenomenon of wind erosion and soil degradation in this region.

Keywords: Steppe, Laghouat, wind erosion, RWEQ.

ملخص :

التعرف علي إمكانيات المنطقة السهبية يساهم الى حد كبير في حمايتها ضد أي شكل من اشكال التدهور و بالتالي تنميتها المستدام . التعرية الريحية هي ظاهرة تؤثر على مناطق شاسعة من السهوب الجزائرية مما يؤدي أحيانا الى تدهور لا رجعة فيه. في منطقة الاغواط مركز أبحاثا ، الرياح نشطة علي مدار السنة اضافتا للممارسات الإنسانية الغير مدروسة غالبا ما يكون السبب في تدهور الأراضي تم استخدام (المعادلة المعدلة للتعرية الرياح) RWEQ لتقدير خسائر التربة في منطقة تقع في الناحية الجنوبية للسهوب ولاية الاغواط . المنطقة المسماة مقران هي منطقة عبور لانتجاع الالاف من رؤوس الأغنام بالإضافة الى نزع غطائها النباتي لاستعمالها في الزراعة البعلية للحبوب مما يؤدي الى التعرية و بالتالي تدهورها بفعل الرياح. في خريف 2013 و ربيع 2014 تم تطبيق النموذج RWEQ لتقدير التدفقات الريحية القصوى وفقدان التربة . الدراسة الميدانية تمت عن طريق التنقل علي طول 20 مقطع افرزت عن 124 نقطة قياس. في المنطقة أبرز المظهر الفيزيونومية 5 وحدات جيوموفولوجية. محطة الرصد الجوي (CR1000) مثبتة في هذا المكان سمحت بتقدير عامل الريح الذي قيمته 3.28 و 4.14 لفصلي الخريف و الربيع علي التوالي. تحاليل التربة لجل نقاط القياس أسفرت عن قوام خفيف اين الرمال تهيمن علي اكثر من 99%. نسبة التربة القابلة للتعرية تصل الى 99% في الخريف وفي الربيع نسبة التربة القابلة للتعرية تتغير من 80%الي 99% . قياس تضاريس سطح التربة بواسطة جهاز قياس تضاريس سطح التربة (rugosimètre) اعطى 2.92 سم كأقصى ارتفاع .بيان مسح الغطاء النباتي اعطى 20.92% كأعلى نسبة للغطاء نباتي للتربة.التدفق الأقصى المقدر بواسطة (RWEQ) اعطى قيم متغيرة وفقا للفصول و الوحدات الجيومورفولجية ، تتراوح القيم بين 30.87 (m-1.Kg) و 419.65 (m-1.Kg) . . الخسارة في التربة المقدرة بواسطة RWEQ تكشف عن قابلية مواتية للظاهرة التعرية الريحية و تدهور الأراضي في هذه المنطقة.

***الكلمات المفتاحية :** السهوب، الأغواط، التعرية الريحي ، RWEQ.*

DEDICACE

A l'âme de ma grand-mère Fatma dite Bettah, je prie Dieu tout puissant de lui accorder sa sainte miséricorde et de l'accueillir en son vaste paradis.

REMERCIEMENTS

Avant tout, nous remercions Dieu le tout puissant, de nous avoir illuminé la voie de la connaissance et du savoir.

Vertueusement, je rendrais grâce à ma Co-promotrice Melle HOUYOU Z, de son efficace contribution et sa poursuite minutieuse dès le début de la réalisation de mon mémoire, jusques et y compris son achèvement, à qui je demeure profondément très reconnaissant.

Je tiens aussi à remercier particulièrement mon promoteur, Monsieur H A BELHORMA, maitre de conférence (A), département de mécanique, Faculté des Sciences. Université Ammar TELEDJI, Laghouat.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à Monsieur ADAMOU A, maitre de conférences (B), Département d'Agronomie, Faculté des Sciences, Université Ammar TELEDJI, Laghouat, pour l'honneur qu'il me fait en acceptant la présidence du jury. Je lui adresse toute ma gratitude.

J'exprime également mes sincères remerciements à Mme SOUIDI Z, maitre de conférences (A), Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, Université Mustapha Stambouli de Mascara, pour s'être intéressé à mon travail et pour avoir accepté de l'examiner en siégeant au sein de ce jury. Qu'il me soit permis de lui exprimer ma sincère gratitude.

Je tiens à remercier vivement Monsieur MEDJELLED A, maitre de conférence (A), département de mécanique, Faculté des Sciences. Université Ammar TELEDJI, Laghouat, pour avoir bien voulu prendre part au jury. Je le remercie pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de juger ce travail. L'occasion m'est offerte pour lui témoigner toute ma gratitude.

Et enfin, je remercie tous ceux et celles qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

L'Algérie un vaste pays d'une superficie de 238 millions d'hectares, parmi lesquels un espace steppique de 20 millions d'hectares qui abrite une population d'environ 6 millions d'habitants dépendante directement des terres de ce milieu pour subvenir à ses besoins.

Les activités principales dans la steppe algérienne sont le pastoralisme et l'agropastoralisme dont les conséquences sont une dégradation de plus en plus croissante des sols de ce territoire. Nombreuses études réalisées dans ces zones confirment une baisse considérable des potentialités fourragères spontanées de leurs parcours au profit de l'extension de terres dégradées et d'une céréaliculture aléatoire (Ghazi et *al.*, 1997 ; Le Houérou, 2005). Aussi l'état des lieux effectué dans la steppe par les services du ministère de l'agriculture algérien, révèle que uniquement un million d'hectare de la surface totale de ce territoire est en bon état. Les parcours moyennement dégradés occupent un espace de 2 millions d'hectares, les parcours dégradés représentent 1,5 millions d'hectare, mais le plus vaste territoire de la steppe algérienne couvre 12 millions d'hectares se trouve dans un état très dégradé, le reste de la steppe étant des espaces improductifs (MADR, 2006).

Les causes de la dégradation de la steppe peuvent être regroupées en deux principales catégories : l'une naturelle (particulièrement l'aridification du climat) et l'autre anthropique (pratiques agropastorales inadéquates).

Le surpâturage et le dénudement des parcours sont à l'origine de la dégradation de la steppe Algérienne (Aidoud et Touffet, 1996). Le changement du mode de vie dans la steppe a bouleversé son équilibre écologique (Nedjraoui et Bédrani, 2008). En Algérie le changement dans le mode d'exploitation de la steppe, l'utilisation pastorale à long terme de ses parcours et les défrichements au profit d'une céréaliculture aléatoire ont contribué à la réduction de la richesse biologique engendrant ainsi la dégradation de ce milieu (Slimani *et al*, 2010).

Les causes de la dégradation des terres sont étroitement liées à la réduction ou à la suppression de la couverture végétale des sols (Bielders et *al.*, 2001 et 2004). La conversion des parcours en terres agricoles favorise à grande échelle leur désertification (Hillel, 1991). La mise en culture des terres et le pâturage dans les écosystèmes fragiles favorise l'action du vent (Smaling *et al.*,1993 ; Sterk et Span, 1997 ; Rajot *et al.*, 2001 ; Bielders *et al.*, 2002, Sterk, 2003). L'enlèvement partiel ou total des particules

superficielles du sol par le vent est donc facilité, dont la conséquence est la dégradation par érosion éolienne ou ensablement des aires.

L'érosion éolienne est un des facteurs qui contribue le plus à la dégradation environnementale par le déplacement de volumes élevés de sables, l'appauvrissement textural et minéral des sols est par conséquent favorisé (Mainguet et Dumay, 2011). Parmi les causes majeures de la dégradation des terres dans le monde, l'érosion éolienne prend une part de 42 % (Middleton et Thomas, 1997). En Algérie le phénomène de l'érosion éolienne dans les régions semi arides et arides du pays est d'ampleur considérable, il constitue un sérieux problème dans les zones steppiques (Bensaid, 2006).

C'est dans ce contexte que ce travail a été engagé dans la région de Laghouat un modèle de la steppe algérienne. La wilaya occupe une superficie totale de 2.505.200 ha, elle supporte une population de 500.000 habitants dont l'activité principale est le pastoralisme. En 2010 on a recensé 1.500.000 têtes d'ovins et 1.531.126 ha de parcours parmi lesquels 1.035.804 ha soit environ 89 % de parcours sont classés dans un état dégradé, alors que seulement 166.720 ha de parcours sont classés dans un bon état, le reste de la superficie étant constituée de forêts, de maquis, de mises en défens et de reboisements (DPSL, 2010). Et de part sa position géographique dans le milieu steppique, la région de Laghouat cumule des éléments qui favorisent la dégradation des terres : une couverture végétale clairsemée et un climat agressif (Lahmar et Ruellan, 2007). La région est une zone à fort transit éolien, le vent provoque des dégâts considérables sur les terres de parcours convertis en terres cultivées (Taibi, 1997 ; Houyou *et al*., 2014). Cependant il est essentiel d'améliorer la connaissance des steppes afin de proposer des aménagements qui en maintiennent les potentialités (Djebaili, 1989). Mais les suggestions des aménagements pour le développement durable de ce milieu fragile nécessitent d'abord la compréhension des phénomènes qui sont à l'origine de sa dégradation.

L'objectif principal de ce mémoire est d'analyser l'aptitude à la dégradation par érosion éolienne d'une zone fortement anthropisée dans la région de Laghouat.

Pour cela trois sous objectifs sont à atteindre :

1- Estimer durant deux périodes de l'année en Automne et au Printemps les capacités maximales du transport des particules des sols en se basant sur le modèle empirique Américain *RWEQ*;

2- Voir le comportement de la zone d'étude vis-à-vis de la dégradation par érosion éolienne durant les deux saisons de l'année ;

3- Analyser la sensibilité des transports maximum aux variations des paramètres qui interviennent dans leurs estimations.

Le mémoire se présente en cinq chapitres après une introduction générale. Dans le premier chapitre nous présentons une synthèse bibliographique sur l'érosion éolienne, les différents modèles utilisés pour sa quantification et la présentation du modèle *RWEQ*. Le second chapitre est consacré aux matériel et méthodes utilisés pour l'élaboration de ce mémoire. Dans le troisième chapitre nous exposons les résultats et leurs analyses respectives. Le quatrième chapitre est consacré à la discussion de nos résultats et enfin dans un cinquième chapitre nous présentons une conclusion et des perspectives.

1. Importance de la dégradation des terres dans le monde

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 de terres nues (18 % environ) et de plans d'eau continentaux (2 % environ).

A l'échelle du globe ce sont les terres des zones sèches qui sont le plus touchées par la dégradation, elles couvrent plus de 6,1 milliards d'hectares, soit 47,2% de la surface terrestre. Près d'un milliard d'hectares de cette superficie sont des déserts hyperarides, avec une très faible productivité biologique. Les 5,1 milliards d'hectares restants sont composés de zones arides, semi-arides et subhumides sèches. Ces terres constituent l'habitat et le lieu de pâturage des troupeaux d'environ 1/5 de la population mondiale. Ils subissent une pression anthropique amplifiée par la menace persistante de sécheresses dont la conséquence est la dégradation de leurs ressources naturelles (UNEP., 2000)

Selon (CSFD, 2002), 70% des terres des zones sèches soit environ 4 milliards d'ha sont affectées de dégradation sévère à modérée. Sur ces terres les activités de l'homme se distinguent dans trois grands domaines :

- Les zones pastorales
- Les zones de cultures pluviales
- Les zones de cultures irriguées

Tableau1 : 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
Réversible (% du total)	46	28	72
Irréversible (% du total)	1	1	2

Source : (Katyal et Vlek, 2000).

2. Formes et processus de la dégradation des terres

La dégradation au sens stricte se produit quand le sol est dégradé sur place sans déplacement ni perte de matériau. Elle porte donc sur les propriétés physiques, chimiques et/ou biologiques du sol. En général, il s'agit d'un processus réversible.

Suite à la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification (UNCCD) qui eut lieu en 1994 à Paris. La définition suivante a été adoptée pour la dégradation des sols :

« *La dégradation des sols est la diminution ou la disparition, dans les zones arides, semi-arides et subhumides sèches, de la productivité biologique ou économique et de la complexité des terres cultivées non irriguées, des terres cultivées irriguées, des parcours, des pâturages, des forêts ou des surfaces boisées du fait de l'utilisation des terres ou d'un ou de plusieurs phénomènes, tels que : l'érosion des sols causée par le vent et/ou l'eau. La détérioration des propriétés physiques, chimiques et biologiques ou économiques des sols, et la disparition à long terme de la végétation naturelle* ».

La dégradation est due principalement à des méthodes d'exploitation inappropriées des terres dont les effets néfastes peuvent être accentués par la péjoration des conditions climatiques. Elle résulte de processus physiques, chimiques et biologiques en interactions qui affectent la productivité des sols et diminuent leur fertilité (Mabutt, 1984).

La dégradation des terres est surtout due aux activités humaines dans des zones initialement défavorisées par la nature. C'est en Afrique qu'elle est la plus accentuée (Mainguet, 1994).

Tableau 2 : Répartition des superficies affectées par la dégradation des terres en Afrique (M ha).

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

Source (UNEP, 2000).

Dans les milieux fragiles, l'érosion éolienne des sols est un des principaux facteurs de leur dégradation, elle perturbe profondément leurs fonctions. L'érosion éolienne provoque un tri sélectif des matériaux déplacés en entrainant préférentiellement les

particules les plus fines du sol. Ce processus affecte à la fois les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques des sols (Casenave et valentin, 1996).

Les processus éoliens qui résultent des interactions entre le vent et la surface des sols sont de première importance dans les régions arides, ils constituent dès lors un facteur majeur qui contribue à la dégradation de leurs terres (Skidmore et Hagen, 1977 ; Mainguet et Chemin, 1978 ; Sterk et Stein, 1997 ; Bielders *et al.*, 2004; Ozer *et al.*, 2005). Dans les zones subsahariennes l'aridification et la dégradation de l'environnement se sont traduites, par un accroissement graduel de concentration en poussières dans l'atmosphère au cours de ces dernières décennies, ces constats sont la preuve de la dégradation des terres par érosion éolienne dans ces zones (Ozer, 2001).

3. La dégradation des terres en Algérie

En Algérie, la dégradation des terres concerne essentiellement les steppes des régions arides et semi-arides qui ont toujours été l'espace privilégié de l'élevage ovin extensif. Depuis plus d'une trentaine d'années, ces écosystèmes connaissent une dégradation de plus en plus accentuée de toutes leurs composantes (flore, couvert végétal, sol et ses éléments, faune et son habitat (Le Houérou, 1985 ; Aidoud et Touffet, 1996 ; Nedjraoui et Bédrani, 2008 ; Wael *et al.*, 2009). Actuellement, le constat majeur est celui d'une diminution de la superficie de ces steppes et de leur dégradation parfois extrême. Il en ressort que la production pastorale dans ces parcours a globalement été marquée par un déclin significatif. Des changements particulièrement rapides et intenses se sont opérés dans ces milieux sous la pression des besoins croissants des populations. Ces derniers sont à l'origine de l'extension des cultures, des changements de politique de gestion et donc des usages et pratiques d'élevage, le tout aggravé par des sécheresses périodiques plus ou moins sévères et prolongées (Bouchetata T et Bouchetata A, 2005 ; Aidoud *et al.*, 2006).

Tableau 3. Répartition de la dégradation des terres dans la steppe Algérienne (M ha).

Type de dégradation	Superficies concernée (Mha)
Très sévère Sévère Moyennement dégradé	12 1,5 2

(Source : MADR ; 2006).

Dans les zones steppiques l'érosion éolienne touche environ 500.000 hectares de terres et plus de 7 millions d'hectares sont directement menacés par le même processus (PNAE-DD, 2002).

4. Erosion éolienne

4.1. Définitions

L'érosion éolienne est un processus qui se produit quand tout ou une partie du sol est déplacé par le vent hors du site où il se trouve, sur une distance variable. Il s'agit d'un processus irréversible. L'érosion éolienne est un phénomène de dégradation du sol usant des vents pour arracher, transporter et déposer des quantités importantes de sédiments (USGS, 2012).

L'érosion éolienne est le phénomène de dégradation du sol sous l'action du vent qui arrache, transporte et dépose des quantités importantes de terre. D'après Nickling (1994) l'érosion éolienne se produit essentiellement dans les régions où le vent est suffisamment fort et le sol est nu, sec et émietté. Elle peut être due à certains effets humains exemple le labour, elle se caractérise par la perte du sol ou bien le transport de ses particules (Bielders *et al.*, 2004). Elle est considéré élément majeur qui cause la dégradation du sol (Mainguet, 1984).

4.2. Les processus de l'érosion éolienne

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

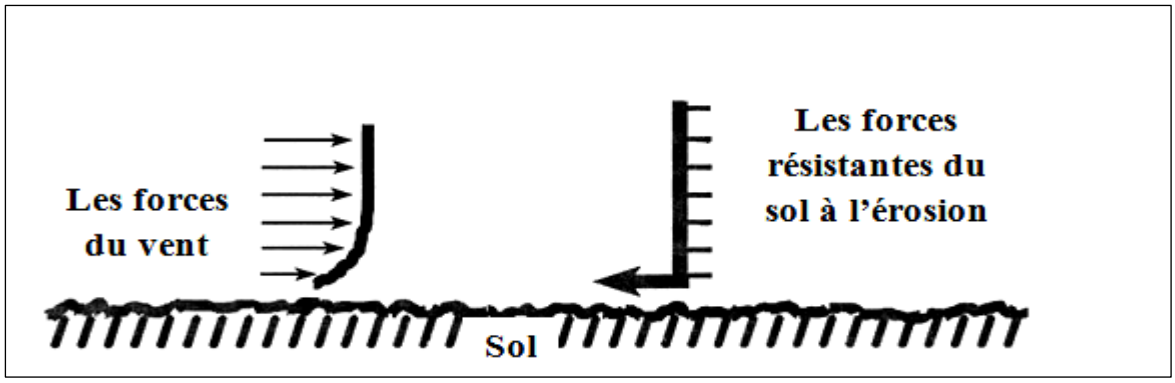


Figure 1 : Les forces intervenant dans le processus de l'érosion éolienne.

Si les forces exercées par le vent excédent les forces de résistance du sol, l'érosion éolienne aura lieu. Par ailleurs si les forces du vent sont en dessus ou égalent les 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).

4.2.1. Les forces d'entraînement pendant le processus de l'érosion éolienne

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.

4.2.2. Le 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 limitées 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)

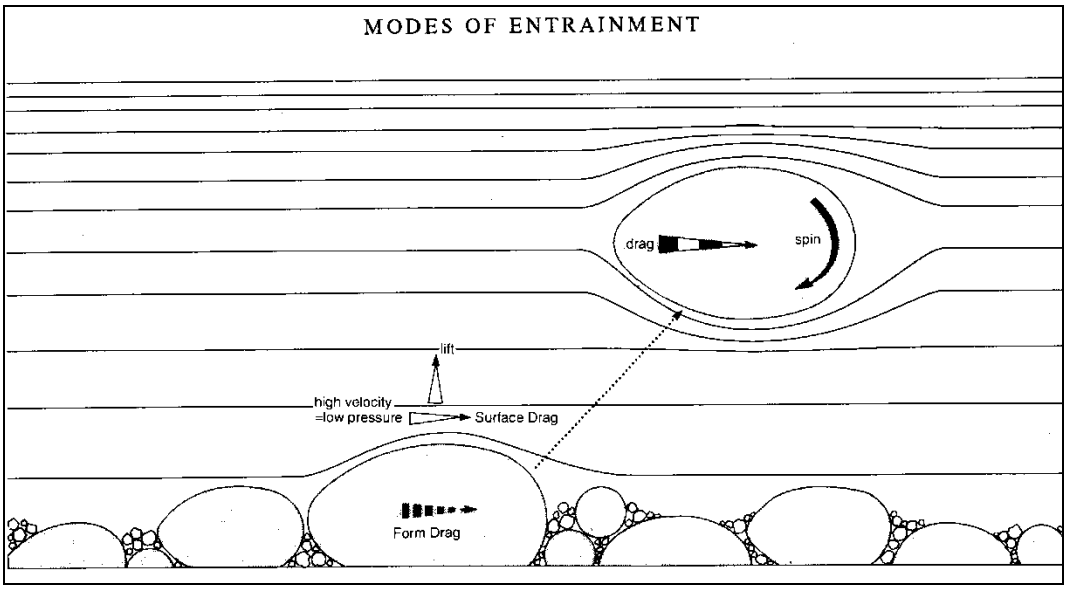
La levée est une force verticale, perpendiculaire à la direction du vent, causée par une différence de pression entre la base et le sommet des grains. Selon le principe de Bernouilli, une vitesse importante sur la face supérieure a pour résultat une pression négligeable alors que, sur la face inferieure. Une vitesse réduite crée une pression prédominante. 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

Tandis que 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



(Source: Cooke *et al.*, 1993)

Figure 2 : Modes d'entraînement des particules, lift (levée), drag (trainée).

- le bombardement

Apres la mise en mouvement initiale des particules, le bombardement devient e 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. 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 évènement venteux (Willet, 1983).Dès que le vent rencontre une plage sableuse, la transition vers l'entraînement par bombardement est presque immédiate (Bagnold, 1953).

4.2.3. Le déplacements 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 à la saltation. 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).

Il existe trois grands types de mouvements des particules en fonction 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 (1980) 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, 1953) et est inférieur 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 µm), 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).

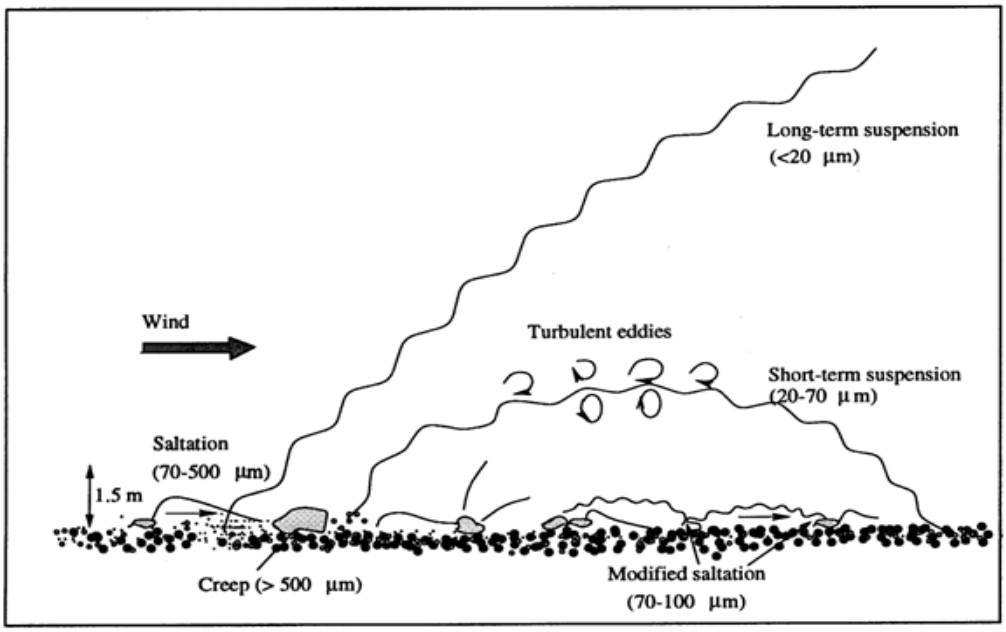


Figure 3 : Illustration des modes de transport pendant un évènement érosif : la saltation, la reptation (creep), et de la suspension (Source: Shao, 2000).

- La saltation est un déplacement par bonds successifs des particules dont le diamètre varie de 100 à 500 (USDA-NRCS., 2002). 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 (sterck, 1997) et couvrir une distance de quelques millimètres à quelques mètres. Cependant La plupart de la saltation s'effectue dans les 30 premiers centimètres (Lyles, 1988) par bonds successifs

Ce transport des particules de 70 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 500 µm. Celles-ci sont poussées par le vent ainsi que par l'impact des particules en saltation.

4.2.4. 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 où les plus grandes particules sont déposées en premier (Toy *et al.*, 2002).

4.2.5. 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 ou l'érosivité est constante et avec une charge en sédiments nulle à son entrée, la figure 4 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 de transport pour un vent (Toy *et al.*, 2002).

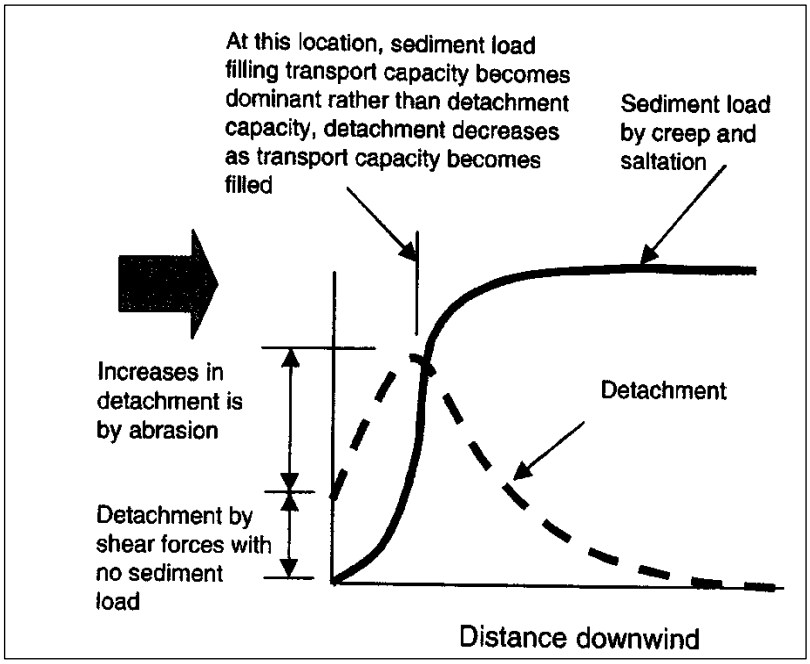


Figure 4 : Relation entre le détachement et la charge en sédiments dans un champs (Source: Toy *et al.*, 2002).

4.3. Profil de vent

Le profil de vent est obtenu par intégration du gradient de flux dans la direction verticale en condition atmosphérique neutre (absence de gradient vertical de température). Il en résulte l'équation 1.

$$U(z) = \frac{u_*}{k} \ln\left(\frac{z}{Z_0}\right) \qquad \textbf{Équation 1}$$

où U(z) est la vitesse du vent en $m.s^{-1}$ à la hauteur z (m) ;

$Z_{0,}$ est la hauteur de rugosité aérodynamique.

k, est la constante de Von Karman pour les flux turbulents. Elle est comprise entre 0,35 et 0,4 (adimensionnelle), u_*, est la vitesse de friction (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 5). 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).

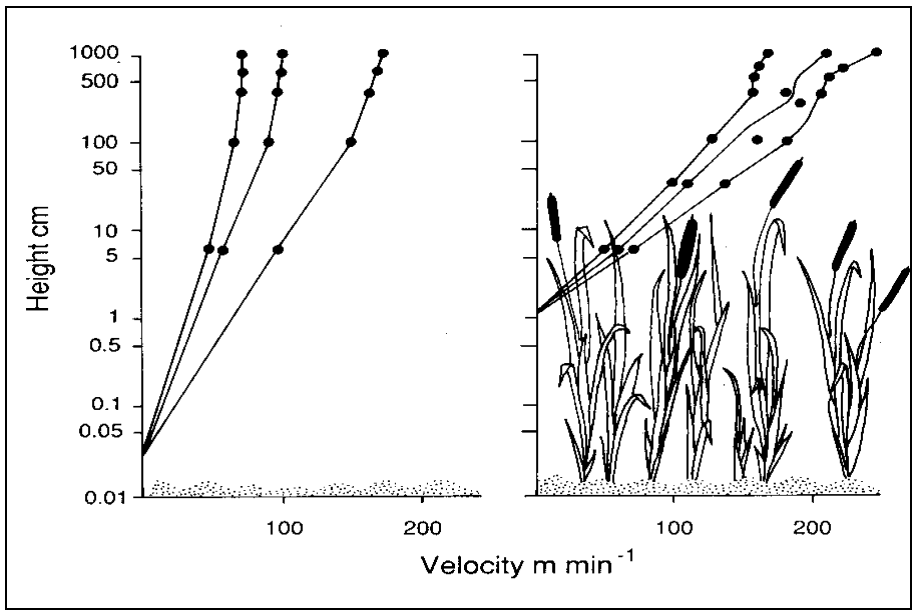


Figure 5 : Variation de la hauteur de rugosité aérodynamique en fonction la couverture du sol (rugosité), (Source: Cooke *et al.*, 1993).

4.4. Facteurs influençant l'érosion éolienne

Fryrear (2000) considère le contenu en eau, la rugosité, l'érodibilité (prédisposition 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.

4.4.1. 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 *et al.*, 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.

4.4.2. 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

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 *et al.*, 1997).

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'entrainement 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 via la formation d'agrégats agissants comme agent liant (Chepil, 1955 ; Toy *et al.*, 2002). En contrepartie, des sols limono-sableux (10-100 µm) n'ont qu'une faible cohésion (Bagnold, 1937). 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, 1954). 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 (Ray et Angers, 1999)

Une stabilité structurale élevée facilite la croissance des plantes en maintenant les espaces poraux 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 erodible.

Un contenu élevé en matière organique favorise la formation d'agrégats (Chepil, 1951 ; Chepil et Woodruff, 1954 ; 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 floculant au sein du sol.

- La teneur en eau

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 (Bielders *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 (1987) 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, 2002 ; FAO, 2009). Des résidus de culture fichés dans le sol peuvent ralentir la vitesse du vent et s'opposer à la mobilisation des particules de sols.

4.5. Conséquences de l'érosion éolienne

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

4.5.1. Conséquences sur les champs et le sol

Le transport de sable par l'érosion éolienne affecte directement les plantes par abrasion. Les coups répétés des grains de sable peuvent endommager les parties sensibles des plantes exposées au vent. Elles peuvent être lacérées par les particules de sol et retardées dans leur croissance entraînant ainsi une baisse de rendement, de qualité et de valeur marchande (Stone et Moore, 1996).

Par ailleurs, une variation de l'épaisseur de la couche de sable peut se produite par endroits. Une accumulation de sable ensevelit la plantule la privant de ressources, et peut engendrer sa mort (figure 6 à gauche). En opposition, une déflation importante déchausse la plante et expose ses racines ce qui accentue la perte en eau et nuit à la croissance de la plante (Bielders *et al.,* 2004) (figure 6 à droite).

Enfin, les sédiments emportés par le vent sont généralement plus fertiles que le matériau parental car, dans un premier temps, seul les particules fines à contenu élevé en nutriments sont mises en mouvement (Leys et Mc Tainsh, 1994 ; Zobeck *et al.,*

1989). Ceci a pour effet l'augmentation de la fraction de particules grossières et la diminution de la proportion de matière organique ce qui produit une couche superficielle de moins bonne structure, une baisse de la capacité de rétention de l'eau et une vulnérabilité à encroûtement rapide en cas de fortes pluies (McKenzie, 2009).

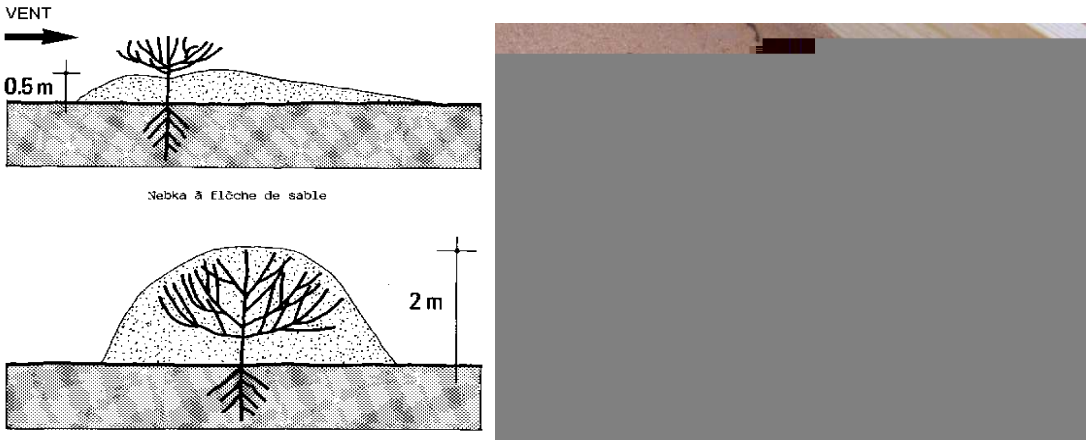


Figure 6 : Conséquences de l'érosion éolienne. A gauche, accumulation de sable liée à la présence d'une plante conduisant à son recouvrement et à la formation d'une nebka. (Source : FAO, 1988). A droite, déchaussement de jeunes plantules d'orge.

Au niveau du sol, l'érosion éolienne retire de manière physique la couche superficielle du sol souvent la plus fertile. La perte de sable fin, limon, argile et particules organiques des sols sableux entraîne une baisse de la capacité de rétention d'eau du sol. En retour, ceci augmente la susceptibilité à l'érosion de ce sol et aggrave le problème. A la longue, une couche plus pauvre en matières organiques avec une structure moins bonne est affleurante, et risque l'encroûtement rapide en cas de forte pluie (McKenzie, 2009).

4.5.2. Conséquences sur la santé

Le Sahara et le Sahel sont le point de départ de très grandes quantités de particules fines dont environ la moitié ont un diamètre inférieur à 2,5 µm (Prospero, 2006).Ces dernières peuvent avoir un effet néfaste sur la santé humaine car elles pénètrent facilement dans le système respiratoire et se déposent ensuite dans les poumons (Utell et Samet, 1996). Un taux élevé de particules et corrélé à une augmentation du taux de mortalité et des problèmes respiratoire. Tels que l'asthme et les bronchites chroniques (Pope, 2000).

4.6. Luttes contre l’érosion éolienne

La lutte contre l'érosion éolienne s'organise à deux niveaux. Il faut d'une part réduire la vitesse du vent à la surface du sol, et d'autre part augmenter la cohésion du matériau face à cette agression. Les méthodes de protection utilisées et les normes établies varient selon l’expérience propre de chaque pays, selon les particularités du périmètre traité, la nature et la disponibilité en matériaux locaux naturels ou artificiels, mais aussi selon la stratégie politico-économique établie en fonction des objectifs recherchés (Mainguet et Dumay, 2011).

L'apport de matières organiques dans les horizons superficiels du sol améliore sa structure.

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

Là où on dispose d'eau, l'irrigation d'appoint peut être une méthode efficace et rentable pour réduire les problèmes d'érosion. Il suffit en effet d'irriguer le sol avant la saison des pluies normales pour permettre le labour dans de bonnes conditions et l'installation d'un couvert végétal avant les tornades qui, généralement, causent des dégâts au début de la saison des pluies. La vitesse du vent peut être réduite en augmentant la densité du couvert végétal. Ceci est évidemment difficile en milieu aride. Il est donc particulièrement important de veiller à une saine gestion des résidus de culture qu'il faut tenter de maintenir à la surface du sol de façon à augmenter la rugosité du terrain, et de protéger la surface du sol (Mainguet et Dumay, 2011).

- **Revised Wind Erosion Équation (*RWEQ*)**

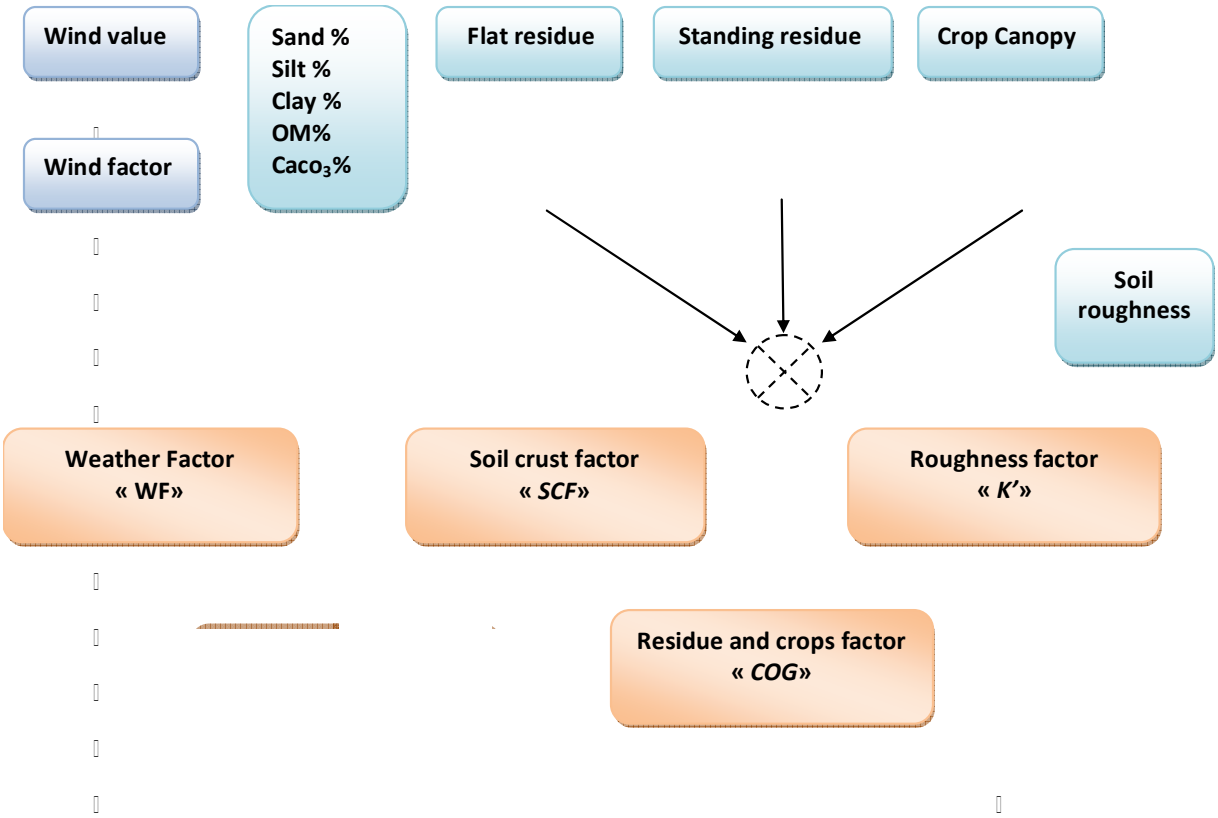
La « Wind Erosion Equation » a été révisée en 1998 et améliorée pour donner la *RWEQ* (Revised Wind Erosion Equation) (Fryrear *et al.*, 1998). Celle-ci a l'avantage de pouvoir prédire la perte en terre pour un évènement érosif ponctuel si l'ensemble des facteurs sont connus. La *RWEQ* mesure les flux de sédiments dans les deux premiers mètres au-dessus du niveau du sol et ne peut donc pas être utilisée dans le cas de tempête où la suspension est le principal mode de transport des particules.

Les pertes potentielles annuelles (E) [t/ha et par an] sont calculées en fonction du facteur climatique (*WF*), du facteur d'érodibilité du sol (EF), du facteur d'encroûtement (*SCF*), du facteur de rugosité du sol (*K'*) et du facteur de la couverture du sol (*COG*). L'interaction entre ces facteurs est donnée par la figure 8.

L'érosion moyenne potentielle annuelle de perte en terre (E), peut donc être exprimée en fonction de différents facteurs (Equation 3).

$$E = f(WF, EF, SCF, K', COG)$$

La *RWEQ* identifie clairement les facteurs fondamentaux dont il faut tenir compte pour pouvoir prédire la perte en terre pour un évènement érosif ponctuel. Les paramètres du modèle se chiffrent à cinq ce qui réduit le nombre de données à récolter sur le terrain. Par ailleurs, si l'ensemble des facteurs sont connus, *RWEQ* peut prédire la perte en terre pour un événement érosif ponctuel. L'inconvénient majeur de ce modèle est qu'il fixe la vitesse-seuil du vent à 5 m/s pour une hauteur de deux mètres sur t


Wind value
Sand %
Silt %
Clay %
OM%
Caco3%
Flat residue
Standing residue
Crop Canopy
Wind factor
Soil roughness
Weather Factor « WF»
Soil crust factor « SCF»
Roughness factor « K'»
Residue and crops factor « COG»

transportées sur un site (Visser *et al.,* 2005). Cependant, ce modèle comporte beaucoup de paramètres et requiert donc une prise de mesures extensive. Il ne prend pas en charge la végétation clairsemée. Enfin, il a été développé pour l'Amérique du Nord et en conséquence n'est pas adapté au contexte sahélien.

- **Modèles experts**

Ces modèles se basent sur les Équations des modèles d'érosion des sols pour développer des indices de vulnérabilité. On attribue aux différents facteurs un poids reflétant leur pertinence (Bales et Neville, 2002).

Le système expert fait appel à des méthodes faciles à mettre en place et fournit des résultats compréhensibles. Toutefois, l'efficacité de ce modèle est conditionné par le choix d'un nombre restreint de facteurs car un modèle plus complet rendra fastidieux l'établissement de la base de connaissance et augmentera le nombre de règles. Les paramètres doivent avoir un pouvoir discriminant net sur les différents états du sol. De plus, l'attribution de poids et de scores à chaque facteur peut s'avérer difficile.

4.7.2. Approche par indicateur

Le césium 137 s'adsorbant très fortement sur les particules du sol sous une forme non échangeable, son suivi permet l'élaboration d'une carte de vulnérabilité à l'érosion éolienne (Chappell, 1996 ; Bonn, 1998 ; Bielders *et al.,* 2004 ; Damnati *et al.,* 2004).

4.7.3. Eolian Mapping Index (EMI)

L'EMI est un indice développé par l'United States Geological Survey (USGS). Il fait intervenir la réflectance du sol et la couverture végétale pour fournir une indication de la vulnérabilité à l'érosion éolienne. Les cartes produites sont des images couleurs superposant les bandes du proche infrarouge, du rouge et leur rapport.

L'EMI présente un intérêt particulier car il nécessite uniquement des données satellites. Néanmoins, cet indice simplifie grossièrement la réalité dû au nombre réduit de facteurs qu'il considère (matériel fin et couverture végétale).En effet, des facteurs jouant un rôle déterminant dans la capacité érosive du veut (degré d'humidité des sols, présence de la végétation sèche, présence de résidus de culture etc.), ont été

négligés. Par ailleurs, une forte réflectance du sol peut également être due à la présence de sel en surface ou un contenu réduit en matières organiques.

Le choix d'un modèle particulier dépend largement du but recherché et des données, du temps et de moyens disponibles. Compte tenu des arguments présentés ci-dessus, le modèle *RWEQ* semble être le plus adapté à nos besoins.

5. Le modèle Revised Wind erosion Equation (RWEQ) : paramètres et équations

5.1. Equation de transport de masse

L'équation qui régit le modèle est la suivante ;

$$Q(x+\Delta x) = Q(x) + \left(\frac{Q_{\max} - Q(x)}{s(x)}\right)\left(\frac{2x}{s(x)}\right)\Delta x \qquad \textbf{Équation 4}$$

où $Q(x)$ représente le flux de masse sur la hauteur du profil considéré [kg/m] et $Q_{\max}$ correspond à la capacité maximale de transport pour un évènement donné, [kg/m],

x, la distance au vent [m], et Δx, l'incrément de distance ;

s(x), la longueur critique du champ [m].

Cette équation évalue en un point x + Δx, le flux de masse sur base du flux de masse au point x incrémenté de l'augmentation de flux sur la distance Δx. La longueur

Où EF est la fraction érodible, *SCF*, le facteur d'encroûtement, *K'*, le coefficient de rugosité, *COG*, le facteur de couverture végétale et *WF*, le facteur climatique.

Tous ces paramètres sont déterminés de manière empirique par les formules qui suivent (Fryrear *et al.*, 1998).

5.2. Facteur climatique

Le facteur climatique du modèle *RWEQ* englobe le facteur éolien (W), l'humidité des sols (SW) et le facteur de couverture de neige (SD). Ce dernier pouvant être négligé en région sahélienne, une valeur unitaire lui sera attribuée.

$$WF = W\frac{\rho}{g}SW \times SD \qquad \textbf{Équation 7}$$

Où W : facteur éolien [kg/m] ;
ρ: densité de l'air [kg/m^3] ;
g : gravité [m/s2] ;
SW : humidité du sol [mm] ;
SD : facteur de couverture de neige [-].

5.2.1. Facteur éolien (W)

Le facteur éolien (W) est déterminé à l'aide de l'Équation 7.1 (Fryrear *et al.*, 1998). Cette dernière met en relation la vitesse du vent et la vitesse de friction au cube (Bagnold, 1941 ; Zingg, 1953).

$$W = \sum_{t=1}^{N}(U_s - U_t)^2 U_s \qquad \textbf{Équation 7.1}$$

Où U_t : vitesse du vent à 2 m par pas de temps d'une minute [m/s] ;
Us : vitesse de friction seuil du vent à 2 m [m/s] ;
N : nombre d'observations de vent sur la période considérée.

5.2.2. Humidité du sol (SW)

La vitesse du vent nécessaire à l'érosion des sols est dépendante du taux d'humidité de ces derniers (Chepil, 1956 ; Fryrear, 1995). On peut estimer l'humidité (SW) à l'aide de l'Équation suivante :

$$SW = \frac{ETP - (R+1)\frac{R_d}{N_d}}{ETP}$$ **Équation 7.2**

Où ETP : évapotranspiration potentielle [mm] ;
R +1 : pluie et irrigation [mm] ;
Rd : nombre de jours de pluie et/ou d'irrigation durant la période de simulation
Nd : nombre de jours pris en compte pour la simulation ;

L'Équation suivante a été développée par Samani et Pessarakli (1986) afin d'estimer l'évapotranspiration potentielle (ETP)

$$ETP = 0.0162\left(\frac{SR}{58.5}\right)(DT + 17.8)$$ **Équation 7.3**

Où SR : radiation solaire totale pour la période étudiée [cal/cm2]

DT : température moyenne [degré centigrade]

Un facteur SW inférieur ou égal à zéro témoigne de précipitations ou d'irrigation importante et d'une évaporation faible. L'érosion éolienne dans ces conditions sera minimale. Un facteur SW de valeur égale à un traduit l'absence de pluie et d'irrigation (Fryrear *et al.*, 1998).

5. 3. Equations du sol

5. 3.1. Facteur érodible de sol, EF

La fraction érodible ou le facteur érodible de sol est le taux de particules présentes dans la couche de sol se trouvant dans les 25 mm premiers mm de la surface du sol et ayant un diamètre inférieur à 0,84 mm (Chepil, 1962). Il est issue directement d'une mesure direct après tamisage à 0.84mm. D'après une formule empirique (Fryrear *et al.*,1994), il est possible de relier le facteur EF aux propriétés physiques et chimiques du sol (Equation 8).

$$EF = \frac{29{,}09 + 0{,}31Sa + 0{,}17Si + 0{,}33\frac{Sa}{Cl} - 2{,}59MO - 0{,}95CaCO_3}{100}$$ **Équation 8**

où Sa, le contenu en sable, en % ; (5,5 à 93,6)

Si, le contenu en limon, en % ; (0,5 à 69,5)

Cl, le contenu en argile, en % ; (1,2 à 53,0)

MO, le contenu en matières organiques, en % ; (0,18 à 4,79)

$CaCO_3$, le contenu en carbonates de calcium, en %. (0 à 25,2)

Cette équation empirique a été établie pour les gammes de valeurs situées ci-dessus entre parenthèses.

5.3.2. Facteur d'encroûtement, SCF

Une redistribution des particules du sol peut se produire suite à l'impact des gouttes de pluie sur le sol, provoquant ainsi la formation d'une croûte de surface. Celle-ci peut augmenter la résistance du sol à l'érosion éolienne. Pour les sols sableux, l'impact des gouttes forme une couche superficielle de grains faiblement attachés, facilement entraînables. La nouvelle couche formée est aérodynamiquement plus lisse que la surface rugueuse présente avant la pluie.

L'équation empirique développée par Hagen *et al.*, (1992) par régression sur base d'expérimentations dans un tunnel à vent est basée sur les teneurs en argiles et en matières organiques (Equation 9). Les limites de validité de cette équation empirique se situent entre parenthèses.

$$SCF = \frac{1}{1 + 0{,}0066(Cl)^2 + 0{,}021(MO)^2}$$ **Équation 9**

Où Cl, le contenu en argiles, en % ; (5 à 39,3 %)

MO, le contenu en matières organiques, en %. (0,32 à 4,74 %)

5.4. Equations de couverture du sol

La quantité et l'orientation des résidus végétaux dans le champ peuvent avoir un impact significatif sur l'érosion éolienne (Chepil, 1944 ; Siddoway et Woodruff, 1965 ; Skidmore *et al.*, 1966 ; Fryrear et Armbrust, 1968). Les paramètres suivants sont pris en compte afin de quantifier l'effet de la végétation et des résidus de culture sur l'érosion éolienne : la fraction du sol recouverte par de la végétation non-érodible, la forme des plants de la végétation et l'évolution de la croissance végétale (Bilbro et Fryrear, 1994). L'influence de ces facteurs a été quantifiée à partir de simulations réalisées dans des tunnels à vent.

5.4.1. Résidus de culture, SLRf (flat residue)

Dans l'équation *RWEQ*, tous les résidus de culture (flat residue) qui se trouvent sur le sol sont pris en compte par un coefficient de perte en terre des résidus de culture, SLR_f (Soil Loss Ratio of Flat residue) développé sur base d'essais en champ et en tunnel à vent. La relation liant la surface de sol couverte avec le SLR_f est la suivante (Equation 10) ;

$$SLR_f = e^{-0,0438(SC)} \qquad \textbf{Équation 10}$$

où SLR_f, coefficient de perte en terre des résidus de culture ;

SC, surface du sol couverte par des résidus végétaux, en %.

Si la présence de gravier est observée, cette fraction est ajoutée au paramètre SC.

Le SLR_f est estimé à partir du pourcentage de couverture du sol par les résidus de culture plats et la charge caillouteuse.

5.4.2. Silhouette des plantes, SLRs (standing residues)

Le nombre, la hauteur et le diamètre des plantes du champ réduisent la vitesse du vent à la surface de celui-ci. Suite aux études en laboratoire (Bilbro et Fryrear, 1994), ces paramètres sont repris dans l'équation 11.

$$SLR_s = e^{-0,0344(SA^{0,06413})} \qquad \textbf{Équation 11}$$

Où SLR_s, coefficient de perte en terre de la silhouette,

SA, aire de la silhouette obtenue en multipliant le nombre de tiges par m² par le diamètre moyen [cm] et par la hauteur de la tige [cm]. Ces mesures ont été réalisées sur le terrain par le comptage et la mesure de la hauteur des plants.

5.4.3. Couverture végétale, SLRc (crop canopy)

Les plantes en se développant produisent une biomasse aérienne qui influe également sur le transport éolien. Cet effet est pris en compte par le paramètre SLR_c (Equation 12).

$$SLR_c = e^{-5.614\left(cc^{0.7366}\right)} \qquad \textbf{Équation 12}$$

où SLR_c représente le facteur de couverture végétale, et cc la fraction de sol couverte par la végétation verte en %. Cette estimation a été faite de la même manière que pour l'estimation des résidus végétaux.

5.4.4. Facteur de la couverture du sol COG

Le facteur de couverture de sol, *COG* (Crop on Ground), est obtenu en multipliant les différentes composantes les unes avec les autres (Equation 13).

$$COG = SLR_f \times SLR_s \times SLR_c \qquad \textbf{Équation 13}$$

Où *COG* est le facteur de couverture du sol,

SLR_f le coefficient de perte en sol lié aux résidus de culture (flat residue) ;

SLR_s le coefficient de perte en sol lié à silhouette des plants (standing residue) ;

SLR_c le coefficient de perte en sol lié à couverture végétale (crop canopy).

5.5. le facteur de rugosité du sol K'

La rugosité du sol prise comme facteur d'entrée dans le modèle *RWEQ* résulte des agrégats de surface ainsi que des opérations de travail du sol qui ensevelissent les

résidus de culture. Elle dépend de la texture, de l'humidité du sol, des résidus de culture et du matériel utilisé.

Le modèle *RWEQ* fait intervenir deux paramètres afin de caractériser la rugosité du sol : la rugosité aléatoire (Crr) et la rugosité orientée en fonction de la direction moyenne du vent et provenant des sillons (K_r).

La rugosité aléatoire peut être mesurée manuellement, par exemple à l'aide d'un rugosimètre à aiguille.

1. Zone d'étude et justification de son choix

La zone d'étude Mokrane (Figure 9) est une zone de formations sableuses, de forme approximativement triangulaire, elle se situe 5 km à l'ouest de la ville de Laghouat. Elle est délimitée à l'est par le Djebel Lahmar qui la sépare de la ville. A l'ouest elle est délimitée par la commune de Kheneg et au nord la zone est limitée par Oued M'Zi. Mokrane est une zone de transhumance et dans laquelle en 1984 fut implanté sur une superficie d'environ 450 ha un périmètre agricole dans le cadre APFA (DSA, 2011). La zone est fortement anthropisée, Laghouat est une zone à fort transit éolien (Taibi, 1997), les hommes dans Mokrane pratiquent différentes activités agraires, la raison pour laquelle nous avons jugé intéressant de voir comment évoluent les flux éoliens dans cette zone.

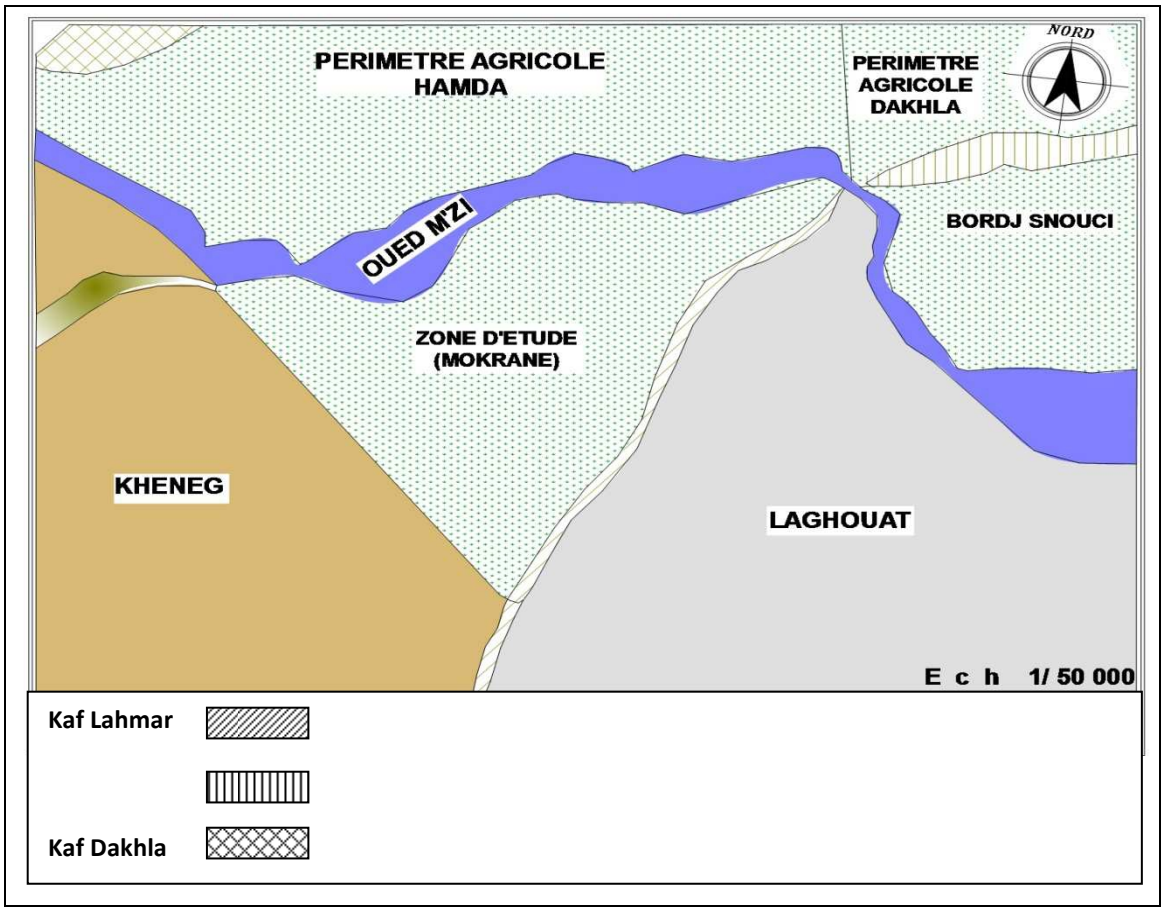


Figure 9 : Localisation de la zone d'étude.

2. Collecte des données

RWEQ requiert des données relatives au climat (données météorologiques), au sol (granulométrie, rugosité, MO, CaCO3) et à sa couverture qui peut être de la végétation ou de la non végétation (résidus plats, charge caillouteuse). La collecte des données s'est déroulée en deux étapes. Une étape a lieu sur le terrain et une autre à travers laquelle nous avons effectué des analyses aux laboratoires.

2.1. Données météorologiques

Une station météorologique est placée dans la zone d'étude. Elle est composée d'un système d'acquisition de données de type CR1000 (Campbell Scientific) qui permet la collecte et l'enregistrement des données, d'un système d'alimentation composé d'un panneau solaire alimentant une batterie de 12 volts et de toute une série de capteurs (Figure 10).

Les capteurs branchés sur la station météo sont les suivants :

- quatre anémomètres placés à 0,45 m, 0,75 m, 1,1m et 3 m au-dessus du niveau du sol ;
- une girouette située à 3 m du sol afin de connaître la direction des vents ;
- un pluviomètre à auget basculeur monté à 2 m au dessus du sol où chaque basculement représente 0,2 mm de pluie ;
- deux sondes de température situées environ 0,6 m et 2,2 m du sol.

Toutes les données sont enregistrées toutes les 15 minutes.

2.2. Données du Sol et de sa couverture

Afin de donner la meilleure représentativité, vingt transects ont été choisis dans la zone de Mokrane sur la base d'images satellites Google Earth de manière à ce qu'ils la traversent verticalement et horizontalement (Annexe 1).

Pour chaque transect un point de départ et d'arrivée ont été définis avec leurs coordonnées respectives, les coordonnées sont ensuite introduites au sein du logiciel Mapsource pour tracer l'itinéraire, et enfin pouvoir les télécharger sur un appareil GPS.

Un GPS de type (Garmin 62st) a été utilisé afin de trouver le point de départ de chaque transect, et permet également de poursuivre l'itinéraire vers le point d'arrivée et d'enregistrer les coordonnées de chaque point de mesure en nous déplaçons sur l'itinéraire du transect.

Une fois sur le terrain, les données qui nous intéressent sont prises pour chaque changement physionomique, nous avons considéré : la géomorphologie du lieu, la végétation présente ou le paysage ce ci constitue un point de mesure sur le transect.

Le point de mesure considéré doit présenter des caractéristiques écologiques continues c'est un site qui selon (Le Floc'h., 2008) est une surface ou les continents écologiques sont considérées comme étant homogène et où la végétation est uniforme. Des lors nous avons évité les zones de transition Les coordonnées de l'ensemble des points sont présentées dans l'annexe 2.

Les critères devant orienter le choix des points de mesure sur le terrain sont les suivant :

-Direction des vents dominants ;

-Présence de sites sableux et caillouteux ;

-Type et nature de la végétation (végétation diffuse, buissons) ;

-Densité de végétation ;

-Présence de parcelles cultivées ;

- Présence de plateaux caillouteux.

En chaque point, sur un diamètre d'environ 100 m des mesures relatives au sol et à la végétation ont été effectuées.

Le même travail du terrain a été effectué durant deux périodes de l'année : Automne et printemps. Les travaux durant la période d'automne ont lieu du 20 Octobre 2013 au 20 Décembre 2013. Le printemps suivant les travaux de terrain se sont déroulés entre le 20 Mars 2014 le 16 Avril 2014.

2.2.1. Echantillonnage sur le terrain

Au niveau de chaque point de mesure uniquement les deux premiers centimètres de la couche superficielle du sol ont été prélevés, du fait que seuls les 2,5 centimètres superficiels du sol sont concernés par l'érosion éolienne (Chepil, 1962). En chaque point de mesure huit prélèvements de sol sont réalisés aléatoirement dans un rayon de 50 m (Figure 11).

Figure 11 : Prélèvement des échantillons du sol.

L'ensemble des échantillons de sol prélevés sont introduits dans un sac en plastique qui est par la suite hermétiquement fermé et étiqueté selon la position du point de mesure (Figure 12).

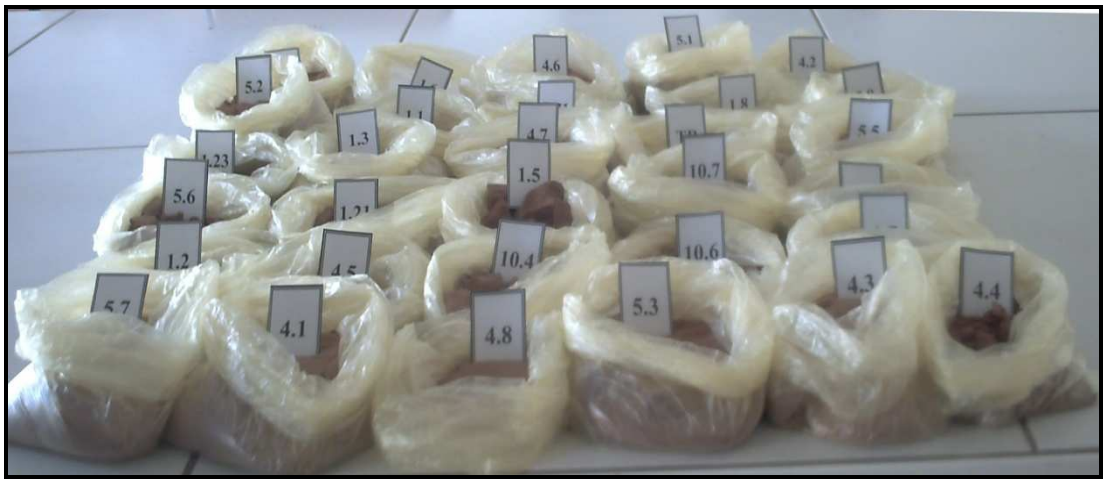


Figure 12 : Echantillons du sol.

2.2.2 .Analyses du sol aux laboratoires

Les analyses de sol ont été effectuées au niveau du laboratoire de pédologie de l'université Tiaret et aux des laboratoires de l'INSID de K'sar Chellala, willaya de Tiaret.

- **Granulométrie**

D'abord un tamisage est réalisé, 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 (H2O2, 6 %) dans un Erlen (200 ml) placé dans un bain marie à 40°C. Le traitement est terminé une fois que plus aucune réaction n'est observée (effervescence) entre la solution et le sol. Les carbonates sont détruits par ajout de HCl (2%) et le sol est ensuite rincé par ajout d'eau qui sont renouvelés toutes les 24 heures jusqu'à obtenir un pH proche de celui de l'eau. L'échantillon de sol est par la suite séché à 105 °C jusqu'à stabilisation du poids.

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

- Le tamisage mécanique des particules dont la grosseur est comprise entre 50 μm et 2000 μm. Six classes de particules minérales identifiées par leur taille:
  - Argiles et limons : < 50 μm,
  - Sables fins : 50 à 250 μm,
  - Sables moyens : 250 à 500 μm,
  - Sables grossiers : 500 μm à 800 μm,
  - Fraction erodible < 840 μm,
  - Sable très grossiers et cailloux 800 μm à 2000 μm.
- L'essai sédimentométrique est par la suite effectué sur la portion des particules de dimensions inférieures à 50 μm.

La sédimentation est basée sur la loi de Stokes qui nous dit que la vitesse de chute d'une particule sphérique, tombant librement dans un fluide, et proportionnelle au carré de son rayon et à sa densité. Cette vitesse est aussi en relation avec la viscosité et la densité du fluide (l'eau, dans le cas présent) (Mathieu et Pieltain, 1998).

D'après Windisch (1999), il est possible de relier cette vitesse de chute au diamètre des particules à partir de l'équation suivante dérivée de la loi de Stokes :

$$D = \sqrt{\frac{18nv}{G_s - G_w}}$$ **Equation 14**

Où n = viscosité du fluide (g/cm×s)

v = vitesse de chute des particules (cm/s)

Gs = densité relative des solides

Gw = densité relative du fluide (varie avec la température)

Les conditions de l'essai (température, agent dispersant) influencent les résultats obtenus. Quelques corrections sont nécessaires. Une correction combinée pour l'agent dispersant et la température doit être effectuée en cours d'essai à partir de lectures sur un cylindre témoin (Windisch, 1999).

- **Les Carbonates de Calcium**

La teneur en calcaire total, qui est l'ensemble du calcaire présent sous toutes ses dimensions dans le sol, permet de préciser le type de sol et de connaître l'importance de ses réserves en CaCO3.

La quantité de CaCO3 dans le sol peut être déterminée en dosant la quantité totale des carbonates, avec le Calcimètre de Bernard, rempli de solution de chlorure de sodium saturée (Duchauffour, 1977). C'est à dire par mesure du volume de CO2 dégagé, suite à l'action d'un excès de l'acide chlorhydrique à 25% (5 ml) sur un poids connu d'échantillon du sol (1 g) selon la réaction :

$$CaCO3 + 2HCl \rightarrow CaCl2 + CO2H2O + CO2$$

Le volume de CO2 dégagé, lors de la réaction entre le sol et l'acide chlorhydrique est proportionnel à la quantité de carbonate présent. Le volume dépend de la température d'où l'étalonnage du calcimètre, qui est effectué, avant chaque série de mesures, avec 0.300 g de CaCO3 pur et sec, par le même procédé que les mesures proprement dites. La teneur de ce dernier est exprimée en %.

- **Estimation du pourcentage de la matière organique**

La méthode de la calcination est effectuée pour l'estimation de la teneur en matière organique pour l'ensemble des échantillons de sol, le principe consiste à incinérer l'échantillon du sol au four à moufle à 800 °C pendant 24 heures.

Cette méthode permet de déterminer la matière organique totale dans le sol par soustraction du poids de l'échantillon incinéré du poids du sol sec initialement mis au four à moufle.

L'équation ci-dessous donne le pourcentage de la matière organique dans le sol :

MO%=(poids sol sec (g)-poids sol incinère(g) /poids sol sec(g))*100 **Équation 1**

2.2.3. Estimation de la rugosité du sol

L'outil utilisé est un rugosimètre à aiguilles, constitué de 50 aiguilles de mêmes dimensions (hauteurs 60 cm), distantes entre elles de 3 mm verticalement mobiles, et d'une plaque localisée en arrière-plan des aiguilles (Figure 13). Pour faire une mesure, on dépose le rugosimètre au sol et on laisse descendre les aiguilles perpendiculairement à la surface du sol de façon à ne pas la perturber. La base des différentes tiges épouse alors la forme du microrelief du sol. Pour chaque mesure, une photo comprenant les sommets de toutes les aiguilles est prise dans l'axe perpendiculaire de la plaque.

Figure 13 : Rugosimètre à aiguilles (cliché Boumeddienne M A).

2.2.4 Couverture du sol végétale et non végétale

2.2.4.1. Pourcentage de la couverture du sol par les résidus végétaux non verts plats et charge caillouteuse (SC)

À l'aide d'un appareil photo digital Canon 7 mégapixels et un cadre en bois 50 x 50 cm, en chaque point de mesure, huit lieux sont photographiés. L'appareil photographique est positionné verticalement à 1 m au-dessus du cadre en bois (Figure 14).

Figure 14 : Photographie des résidus végétaux non verts plats et le charge caillouteuse.

Les pourcentages de la couverture du sol par les résidus végétaux non verts plats et charge caillouteuse sont estimés directement à partir des photos prises. Un maillage de chaque photographie est effectué (Annexe 3), il sert à la détermination du pourcentage de chaque élément de mesure par comptage visuel sur un écran d'ordinateur en superpositionnant une grille de 625 cases aux photos. La grille offrant le meilleur compromis comporte 625 mailles, et la longueur de maille équivaut à 2 cm sur le terrain. Le nombre d'intersection du quadrillage coïncidant avec les résidus végétaux non verts plats et charge caillouteuse est comptabilisé.

En général, une augmentation de la densité du quadrillage (petite maille) se traduit par une amélioration de l'exactitude et de la fiabilité du comptage mais requière d'avantage de temps.

2.2.4.2. Pourcentage de la couverture par la végétation verte (CC) (Recouvrement global de la végétation)

Deux types de végétation sont rencontrés dans Mokrane. Une végétation cultivée et une autre spontanée naturellement présente. A cet effet, deux méthodes ont été utilisées :

- **Végétation spontanée**

Pour pouvoir estimer le pourcentage de la couverture végétale d'une manière plus aisée et pratique au niveau de chaque point de mesure, nous avons opté pour la méthode de Parker (Figure 15) qui nous semble être appropriée au contexte steppique de la région d'étude. Elle répond le mieux à l'évolution pastorale où la végétation est ouverte. D'ailleurs, c'est une méthode fréquemment utilisée pour l'évaluation du couvert végétal des zones steppiques en Australie et en Afrique du Sud (Daget et Poissonnet, 1972).

Le principe de la méthode de Parker consiste à étendre, au centre du point de mesure, un ruban d'une longueur de 30 m, dans le sens Nord, désigné à l'aide d'une boussole. Une barre de métal est posée au centre pour attacher à lui le ruban et faisant la coupe n° 01, puis le ruban est déplacé d'un angle de 120° dans la direction des aiguilles d'une montre (la fin attachée au centre reste intacte) pour faire la coupe n° 02 et de la même façon, on bouge le ruban de 120° à la direction des aiguilles d'une montre pour obtenir la coupe n° 03. La Figure 15 montre la façon de faire les coupes.

Pour faciliter l'estimation du pourcentage de la couverture végétale, des placettes de 1*1m^2 et des placettes de 4 * 5 m^2 sont délimitées.

A une distance de 6 m, tout au long de chaque coupe (1, 2 et 3) et du côté droit, un carré est posé dont la superficie est de (1*1) m², le nombre total des carrés dans une seule coupe est 05 carrés (Figure 15). Dans chaque carré, le nombre des individus de chaque espèce végétale est compté, des mesures du diamètre et de la hauteur sont effectuées.

La distribution des carrés se répète sur les coupes 02 et 03 et les lectures sont prises de la même manière, soit la superficie totale des carrés 15 m² (Figure 15).

Les autres carrés de 4*5 m² sont posés du coté droit à l'extrémité de chaque coupe. Deux autres carrés de mêmes dimensions sont posés aléatoirement au niveau du point de mesure. Dans chaque carré, le nombre des individus de chaque espèce végétale est compté, des mesures du diamètre et de la hauteur sont effectuées pour ces derniers.

Le recouvrement est déterminé par la projection des organes aériens des plants présentent sur le sol. L'approche du calcul du recouvrement est variable en fonction de la forme de chaque plante, qui peut être circulaire ou rectangulaire. Dans notre cas, on opte pour une forme circulaire en estimant le diamètre moyen des tiges des plantes.

A partir de cela, la surface recouverte est calculée

$$\mathbf{Cc\ (m^2) = \pi * (d^2/4)} \qquad \textbf{Équation 2}$$

Où : **Cc** est le recouvrement

d est le rayon.

Le taux de recouvrement des plantes est déduit en rapportant le recouvrement estimé à la surface totale considérée (115 m2).

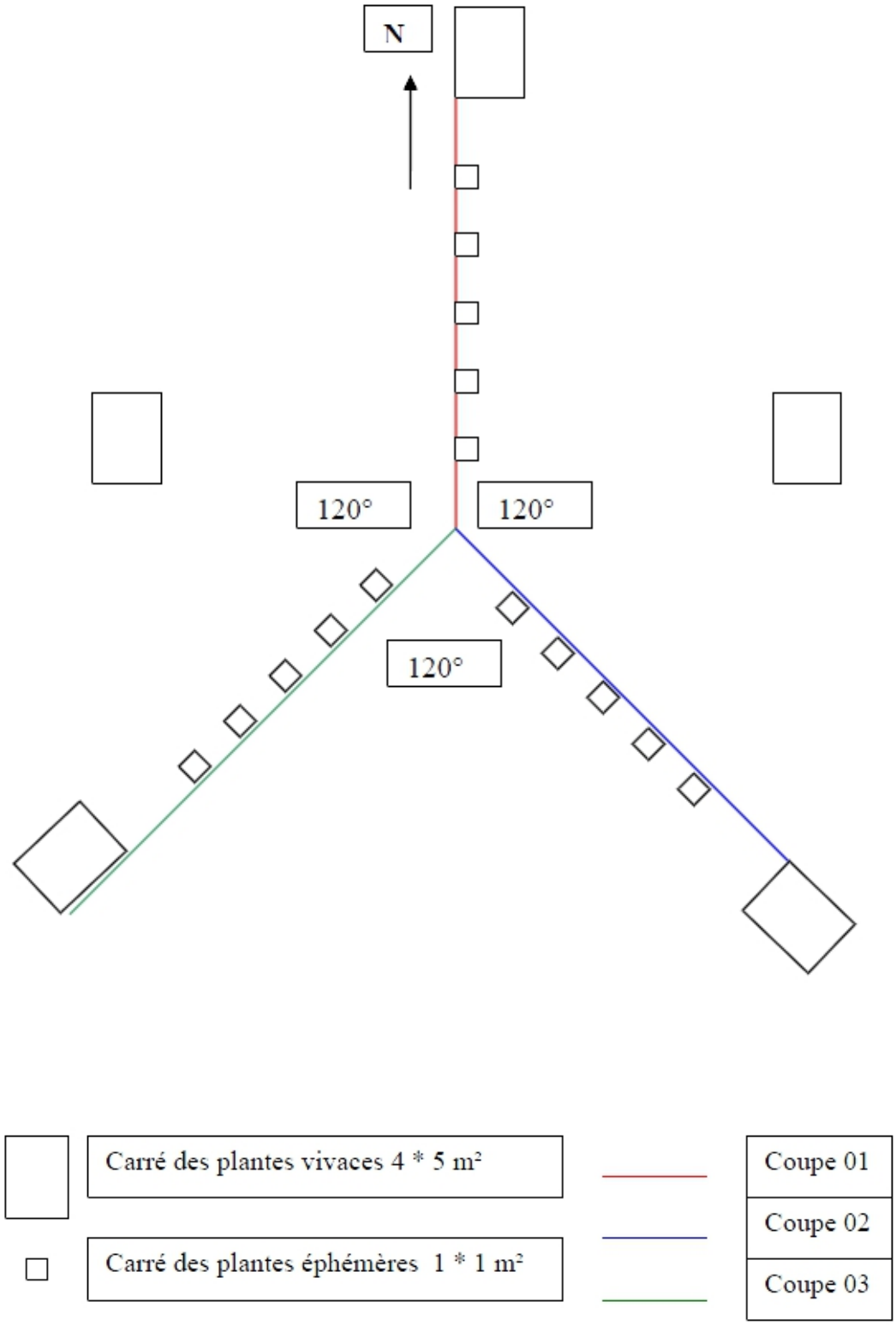


Figure 15 : Schéma explicatif de la méthode Parker.

La méthode ainsi choisie nous a permis de réaliser un inventaire de la végétation présente dans les points de mesures durant les deux périodes de l'année.

- **Végétation cultivée**

Pour les parcelles labourées, la méthode adoptée est celle décrite dans **(**Brifaux, 1991), elle permet de mesurer les paramètres d'une céréale cultivée (densité, rendements…) en utilisant des placettes de dimensions données. Pour cela un cadre en bois de 50 x 50 cm est placé le long des deux diagonales en nous déplaçons d'un pas de 10 m sur les parcelles cultivées. On procède par la suite à un comptage du nombre de plants et aux mesures du diamètre moyens des thalles et leurs hauteurs respectifs (Figure 16). Le pourcentage de la couverture végétale du sol est alors calculé.

$S\ (m^2) = Cc = n*[\pi * (d^2/4)]$ **Equation 3**

Nous optons pour un recouvrement circulaire

d= diamètre moyen des plants comptés ;

n= nombres de plants comptés dans le cadre.

Cc = recouvrement de la végétation cultivée.

Le taux de recouvrement des plantes est déduit en rapportant le recouvrement estimé dans l'ensemble des cadres à la surface totale considérée (4,25 m^2).

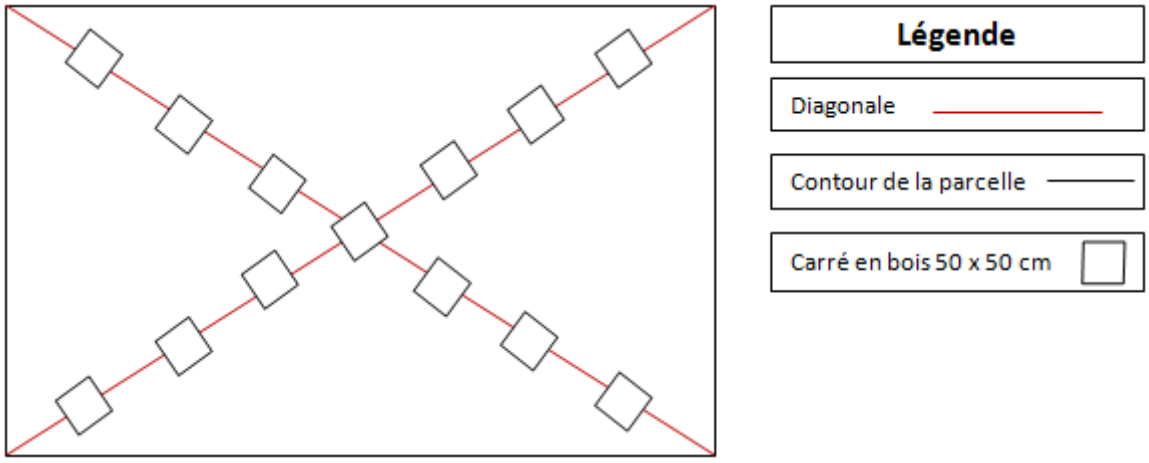


Figure 16 : Schéma explicatif de la méthode de la diagonale

2.2.4.3. Surface couverte par la silhouette des plantes sur pieds (SA)

De la même manière pour la végétation spontanée et la végétation cultivée, la silhouette de la végétation verte est obtenue en multipliant le nombre de tiges des plants présents dans 1m² par le diamètre moyen et par leurs hauteurs moyennes.

$$SA = \sum [\pi * (d^2/4) * h]/n \qquad \textbf{Équation 4}$$

d= Diamètre moyen des plants comptés ;

n= Nombre de plants comptés.

h= Hauteur des plants comptés

SA= Silhouette de la végétation verte.

2.2.5. Identification des espèces

Afin d'établir la liste floristique, les espèces sont prélevées et introduites dans des sacs codés.

L'identification des espèces s'est faite avec utilisation de Quézel et Santa (1962-1963), la Flore du Sahara d'Ozenda (1977) et Ozenda (1991).

2.2.6. La richesse totale (S)

Elle représente en définitive un des paramètres fondamentaux caractéristique d'un peuplement et représente la mesure la plus fréquemment utilisée de sa biodiversité. La richesse totale S, est le nombre total d'espèces que comporte le peuplement considéré dans un écosystème donné (Ramade, 2003).

Pour classer notre richesse totale, nous avons utilisé l'échelle de Daget et Poissonet (1991) :

- Raréfiée : < de 5 espèces ;
- Très pauvre : de 6 à 10 espèces ;
- Pauvre : de 11 à 20 espèces ;
- Moyenne : de 21 à 30 espèces ;
- Assez riche : de 31 à 40 espèces ;

- Riche : de 41 à 60 espèces ;
- Très riches : de 61 à 75 espèces.

3. Méthodologie de l'exploitation des données pour la modélisation

Les éléments entrants dans le modèle *RWEQ* pour l'estimation du $\boldsymbol{Q_{max}}$ nécessitent le calcul des paramètres suivants : le facteur de la rugosité (*K'*), le facteur Erodible (*EF*), le facteur d'encroutement (*SCF*), le facteur de la couverture du sol (*COG*) et le facteur climatique (*WF*). Les méthodes qui ont servi à leur calcules sont présentés ci-dessous :

3.1. Le facteur climatique (WF)

Les données de la vitesse du vent à 3 m ont été utilisé, s'étalant sur les deux périodes de sortie sur le terrain, issues de la station météorologique et la vitesse seuil de friction (calculée) [m/s] dans la zone d'étude 6.72 m/s (Houyou *et al.,* 2014), nous ont permis de calculer le facteur du vent (*WF*) en appliquant l'équation 7.1 et l'équation 7 (chapitre 2, partie 5.2). Il est à noter que seul le facteur du vent est considéré dans cette étude, le facteur de couverture de neige et l'humidité du sol ont pris une valeur qui vaut à 1. À cet effet le facteur climatique prend uniquement les valeurs du facteur du vent.

3.2. La fraction érodible (EF)

Les analyses du sol relatives aux pourcentages des sables, limons, argiles, carbonates de calcium, et de la matière organique ont servi pour le calcul du facteur érodible (*EF*) en appliquant l'équation 8, (chapitre 2, partie 5.3.1.). Dans notre cas, cette équation ne sera pas nécessaire pour la modélisation car nous disposons du pourcentage du sol avec un diamètre inferieur à 840 µm sur les premiers 20 mm du sol qui représente la fraction erodible (*FE*). Il sera néanmoins possible de vérifier l'adéquation de cette formule empirique puisque nous disposons à la fois du pourcentage de particules supérieures à 840 µm et des données texturales, teneurs en matière organique et en carbonates.

3.3. Le facteur d'encroutement (SCF)

Le pourcentage d'argile et de la matière organique ont servi pour le calcul du facteur encroutement en appliquant l'équation 9, (chapitre 2, partie 5.3.2.).

3.4. Le facteur de rugosité (K')

Un programme informatique (Stolte, 2003) permet de référencer la position des aiguilles en coordonnée X (position relative) et Y (hauteur relative). L'écart type de la hauteur relative (Y) des aiguilles exprime la rugosité (cm) du sol du secteur de mesure.

3.5. Le facteur de la couverture du sol (COG)

Le facteur de la couverture du sol est calculé en multipliant les trois coefficients qui se rapportant à l'équation de la couverture du sol (SLR_f, SLR_S et SLR_C). L'équation 13, (chapitre 2, partie 5.4.).

3.5.1. Le coefficient de perte en sol associé aux résidus de culture et la charge caillouteuse se trouvant à la surface du sol (SLR_f)

Le pourcentage de la couverture du sol par les résidus végétaux non verts plats et la charge caillouteuse (*SC*) a servi au calcul du coefficient de perte en sol associé aux résidus de culture et à la charge caillouteuse se trouvant à la surface du sol (SLR_f) en appliquant l'équation 10, (chapitre 2, partie 5.4.1.).

3.5.2. Le coefficient de perte en sol se rapportant à la silhouette des plantes (SLRS)

La surface couverte par la silhouette des plantes sur pieds (*SA*) a servi au calcul du coefficient de perte en sol se rapportant à la silhouette des plantes (SLR_S) en appliquant l'équation 11, (chapitre 2, partie 5.4.2.).

3.5.3. Le coefficient de perte en sol associé à la couverture végétale (SLR_C)

Le pourcentage de la couverture par la végétation verte (CC) a servi au calcul du coefficient de perte en sol associé à la couverture végétale (SLRC) en appliquant l'équation 12, (chapitre 2, partie 5.4.3.).

3.6. Modélisation

Une fois les paramètres entrants du modèle *RWEQ*, le facteur de la rugosité (*K'*), le facteur Erodible (*EF*), le facteur d'encroutement (SCF), le facteur de la couverture du sol (*COG*) et le facteur climatique (*WF*), sont estimés ; l'estimation du $\boldsymbol{Q_{max}}$ est rendue possible en appliquant l'équation 5, (chapitre 2, partie 5.1).

3.7. Analyses statistiques des données de terrain

Les données de sols collectées ont subit des tests ANOVA au seuil de 5% à l'aide du logiciel Minitab (version17).

3.8. Cartographie des flux de masse dans Mokrane

Le positionnement des flux de masse estimés par *RWEQ* dans la zone de Mokrane a été réalisé en nous aidant du logiciel ArcGis (version 9.2).

1. Climatologie de la zone d'étude

La climatologie de la zone d'étude concerne la période durant laquelle, nous avons effectué nos travaux de recherche sur terrain et aux laboratoires, elle va de Septembre 2013 à Mai 2014.

1.1. Précipitations

Les enregistrements journaliers montrent que de Septembre 2013 à mi-octobre les précipitations sont inférieures à 10 mm. De la mi-octobre 2013 à la fin Décembre 2013 les mois sont secs. A partir du début de Janvier 2014 et jusqu'au mois de Mars 2014 les précipitations journalières n'ont pas dépassé les 50 mm. En Mars 2014 les plus fortes précipitations enregistrées dépassant 150 mm. A partir d'Avril 2014 une phase de sécheresse est enregistrée (Figure 17).

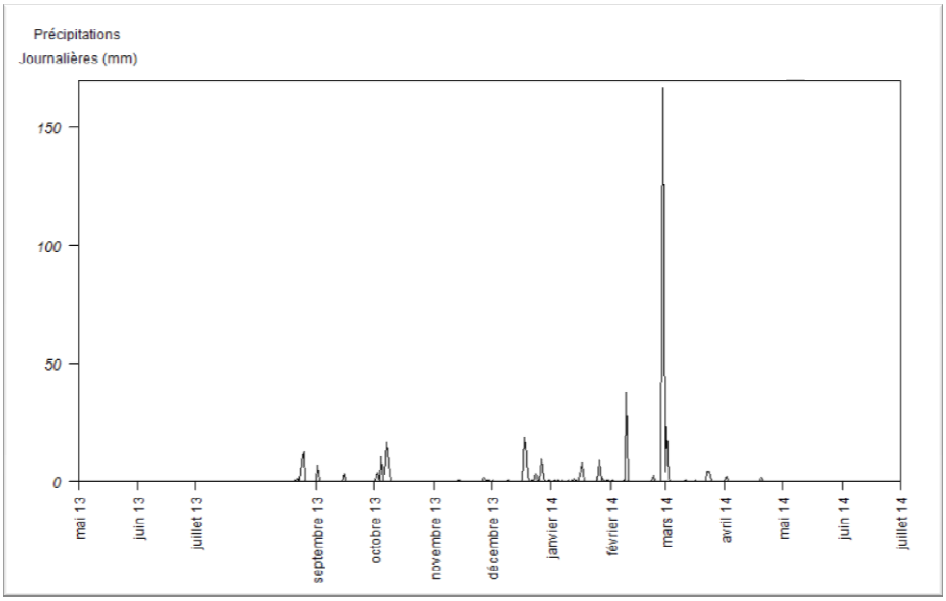


Figure 17 : Evolution des précipitations journalières durant la période allant de Septembre 2013 à Mai 2014 dans la région de Mokrane.

1.2. Températures

La figure 18 montre l'évolution des températures maximales, moyennes et minimales journalières dans la zone d'étude. Une tendance de saisonnalité est observée, en Septembre 2013 des températures proches de 40°C sont enregistrées, ensuite elles commencent à chuter pour atteindre des minimums négatifs en Décembre 2013 et Janvier 2014. Les températures journalières moyennes les plus basses sont enregistrées en Décembre 2013.

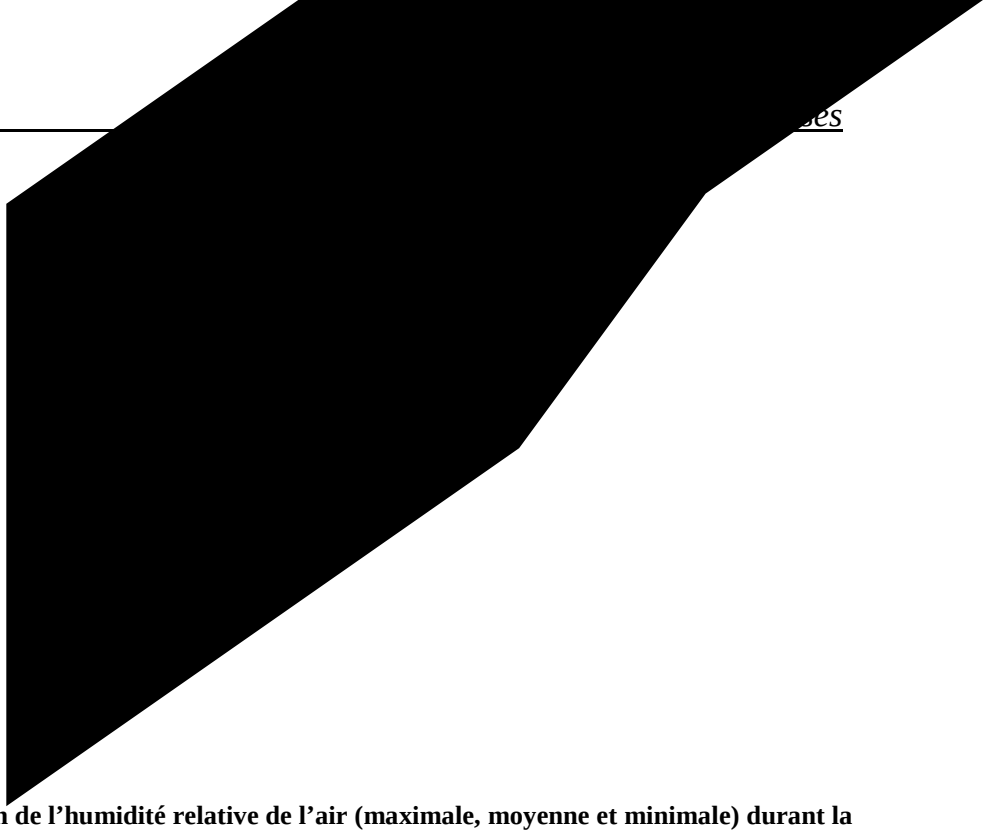


Figure 19 : Evolution de l'humidité relative de l'air (maximale, moyenne et minimale) durant la période allant de Septembre 2013 à Mai 2014 dans la région de Mokrane.

1. 4. Vitesse du vent

Les plus fortes vitesses de vent sont enregistrées en Janvier 2014, des maximums qui dépassent les 17 m/s. Entre Févier 2014 et fin Mars 2014, nous observons des vitesses de vent maximales relativement moins élevées mais qui dépassent 15 m/s. A partir de Mars 2014 les vitesses maximales du vent chutent ma

- Espaces interdunaires (U5) : des espaces interdunaires plats présentant environ un diamètre maximum de 120 m, le sol est généralement compact et présente une croûte superficielle de couleur brune rougeâtre et une charge caillouteuse parsemée à la surface. (Figure 22).

Figure 22 : les différentes unités géomorphologiques identifiées sur le terrain(1) Dunes (U1), (2) Hamada (U2), (3) Reg (U4), (4) espaces interdunaires (U5) et (5) et les parcelles cultivées (U3).

Les 124 points identifiés sur le terrain se répartissent comme suit : 10 points de mesures (U1), 35 points de (U2), 37 points de (U3), 34 points présentant de (U4) et 8 points de mesure donnent des (U5).

2.1. Elévation des unités géomorphologiques

Pour l'ensemble des points de mesure, les elevations dans Mokrane sont variables entre un minimum 796 m et un maximum 806 m.

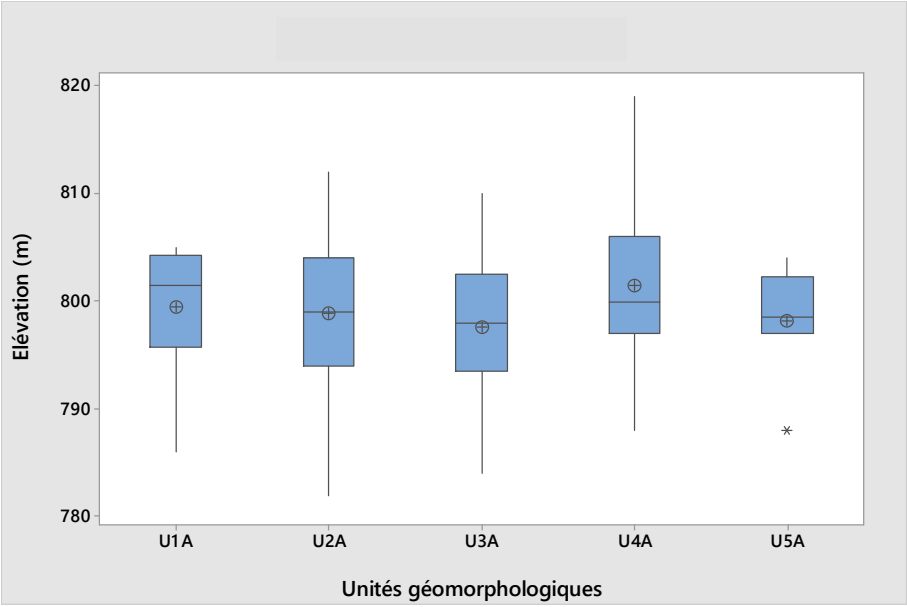


Figure 23 : Evolution de l'élévation des unités géomorphologiques.

Le test ANOVA effectué au seuil de 5% sur les élévations a révélé une différence non significative de l'élévation dans les unités géomorphologiques (P=0.117). Il semble que l'effet de l'unité géomorphologique sur l'élévation est non significatif (tableau 4).

Tableau 4 : Résultats du test ANOVA pour les élévations.

Facteur	SC	ddl	MC	F	P
Elévation (m)	264,4	4	66.09	1.61	0.117
Erreur	4892,8	119	41.12		
Total	5157,1	123			

3. Analyses Floristique dans les unités géomorphologiques

Les relevés de végétation dans la zone d'étude ont été effectués pour pouvoir estimer le pourcentage de la couverture végétale qui est un paramètre entrant dans le modèle RWEQ. La méthode Parker est celle qui nous a offert la meilleure possibilité pour l'estimation de la valeur de ce paramètre, et vue l'orientation de notre travail de recherche, nous nous

contenterons dans ce document uniquement de la présentation des résultats de la richesse totale de la végétation présente dans la zone de Mokrane durant les deux périodes de l'année. Les autres indices écologiques ne seront pas exposés dans ce mémoire.

3.1. Richesse totale de Mokrane en automne

En automne, dans la zone de Mokrane nous avons dénombré 11 espèces appartenant à 11 genres et 8 familles. Le nombre de famille recensé dans les (U1) est de 3, avec 3 genres et 3 espèces. Sur les steppes ensablées, 8 espèces regroupées dans 8 genres et 6 familles ont été recensés. Au niveau des petits plateaux caillouteux, nous avons pu dénombrer 4 genres et 4 espèces appartenant à 4 familles. Le nombre de familles recensées dans les (U5) est de 6 représentées par 6 genres et 6 espèces (Tableau 5).

Tableau 5 : Richesse totale de la zone de Mokrane en automne.

Famille	**Genre**	**Espèces**	**Unité géomorphologique**
Euphorbiaceae	*Euphorbia*	*Euphorbia guyoniana* ***Boiss.***	U1.U2
Caryophyllaceae	*Silene*	*Silene arenarioides* ***Desf.***	U2.U4
Fabaceae	*Astragalus*	*Astragalus armatus* ***Willd.***	U2.U4.U5
	Retama	*Retama raetam* ***Forssk.***	U1.U2
Thymelaeaceae	*Thymelaea*	*Thymelaea microphylla* ***Coss et Dur.***	U2.U4.U5
Poaceae	*Stipa*	*Stipa tenacissima* ***L.***	U3
	Aristida	*Aristida pungens* ***Desf.***	U1.U2.U5
Brassicaceae	*Eruca*	*Eruca vesicaria* ***Thell.***	U5
Asteraceae	*Evax*	*Evax desertorum* ***Pomel.***	U2.U5
	Echinops	*Echinops spinosus* ***L.***	U2.U4
Chenopodiaceae	*Salsola*	*Salsola vermiculata* ***L.***	U5

3.2. Richesse totale de Mokrane au printemps

Au printemps, la richesse végétale est relativement plus importante dans la zone de Mokrane en automne, nous avons pu dénombrer 27 espèces appartenant à 25 genres et 14 familles. Le nombre de familles recensées dans les (U1) est de 5, avec 5 genres et 5 espèces. Pour les steppes ensablées, 14 espèces regroupées dans 13 genres et 6 familles ont été dénombrées. Au niveau des petits plateaux caillouteux, le nombre de familles recensées est de l'ordre de 10, représentées par 12 genres et 12 espèces. Le nombre de familles recensées dans les (U5) est de 11, avec 16 genres et 16 espèces. (Tableau 6).

Tableau 6 : Richesse totale de la zone de Mokrane au printemps.

Famille	**Genre**	**Espèces**	**Unité géomorphologique**
Euphorbiaceae	*Euphorbia L*	*Euphorbia guyoniana* ***Boiss.***	U1.U2
		Euphorbia helioscopia ***L.***	U5
Caryophyllaceae	*Silene L*	*Silene arenarioides* ***Desf.***	U1.U2.U5
Fabaceae	*Astragalus*	*Astragalus armatus* ***Willd.***	U2.U4.U5
	Retama L	*Retama raetam* ***Forssk.***	U1.U2.U4.U5
	Argyrolobium	*Argyrolobium uniflorum* ***Decne.***	U2
	Genista	*Genista uniflora* ***Briq.***	U2.U5
Thymelaeaceae	*Thymelaea*	*Thymelaea microphylla* ***Coss et Dur.***	U1.U2.U5
		Thymelaea hirsuta ***L.***	U2
Poaceae	*Stipa L.*	*Stipa tenacissima* ***L.***	U4
	Aristida L	*Aristida pungens* ***Desf.***	U1.U2.U5
Asteraceae	*Evax L*	*Evax desertorum* ***Pomel.***	U2
	Echinops L	*Echinops spinosus* ***L.***	U2.U4.U5
	Atractylis L.	*Atractylis serratuloides* ***Sieber ex Cass***	U2.U5
	Ifloga	*Ifloga spicata* ***Vahl.***	U2.U5
	Picris	*Picris coronopifolia* ***(Desf.)***	U2.U5
Chenopodiaceae	*Salsola*	*Salsola vermiculata* ***L.***	U4.U5
Brassicaceae	*Eruca*	*Eruca vesicaria* ***Thell.***	U4
	Oudneya	*Oudneya africana* ***R. Br.***	U4
	Malcomia	*Malcomia aegyptiaca* ***Spr.***	U5
Capparidaceae	*Cleome*	*Cleome arabica* ***L.***	U4
Distaceae	*Helianthemum*	*Helianthemum getalum* ***Pomel.***	U4
Geraniaceae	*Erodium*	*Erodium triangulare* ***Forssk.***	U4
	Erodium	*Erodium moschatum* ***Var.***	U5
Plantaginaceae	*Plantago*	*Plantago albicans* ***L.***	U4.U5
Tamaricaceae	*Tamarix*	*Tamarix articulata* ***Vahl.***	U4
Zygophyllaceae	*Peganum*	*Peganum harmala* ***L.***	U5

4. Résultats des paramètres du sol et sa couverture

4.1. Granulométrie de la couche superficielle du sol

4.1.1. Sables

Les valeurs des pourcentages des sables de l'analyse granulométriques de la couche superficielle du sol effectuée pour chaque unité géomorphologique sont présentées en (Figure 24). Les chiffres montrent qu'au niveau des (U1) en automne, le pourcentage de sable est compris entre 97,47% et 99,77% et est entre 97% et 99% au printemps. Les (U2) donnent un pourcentage de sable variable entre 97.66% et 99.67 %, et est entre 97.12% et 99.21% au printemps. Dans les (U3) en automne, les pourcentages de sables varient de 98 % à 99.65%, et sont entre 93.07 % et 98.41% au printemps. Au niveau des petits plateaux caillouteux, l'analyse granulométriques a montré qu'en automne, le pourcentage de sable est situé entre 96.28% et 99.70%, et est entre 84 et 98.41% au printemps, ce dernier est aussi le plus large intervalle observé. Les (U5) donnent en automne, un pourcentage de sable compris entre 98.65% et 99.13%, et se situe entre 97.54% et 99% au printemps (Figure 24). Ces chiffres montrent aussi que le minimum de la fraction sableuse (84%) est présent dans les petits plateaux caillouteux, alors que la fraction maximale de sable est de (99,77%) est observée au niveau de dunes peu végétalisées.

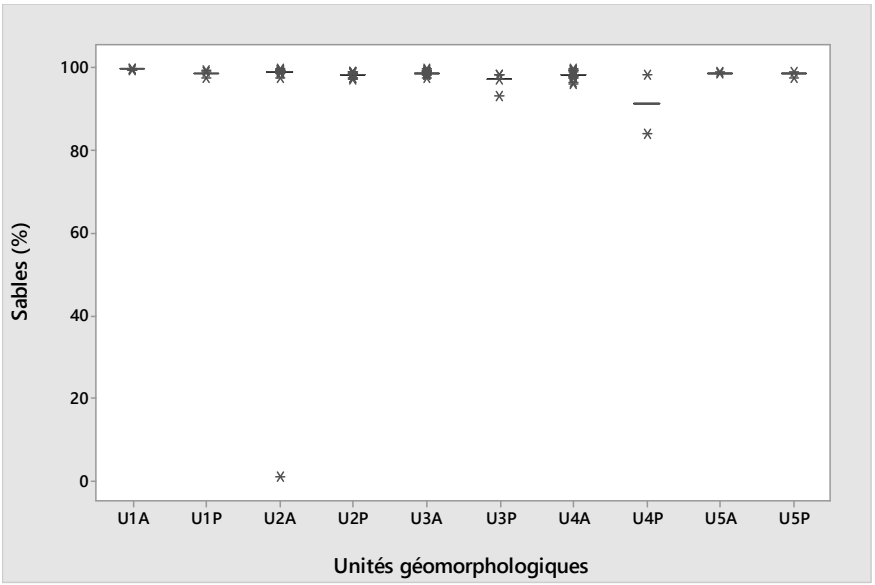


Figure 24 : Evolution du pourcentage de la fraction sableuse au niveau des unités géomorphologiques en automne (A) et au printemps (P).

4.1.2. Limons

Les pourcentages des limons de l'analyse granulométriques de la couche superficielle du sol pour chaque unité géomorphologique sont présentés en (Figure 25). Le minimum de la fraction limoneuse 0,07% est observé dans les dunes peu végétalisées, alors que le maximum est de 11,2% est observé au niveau des petits plateaux caillouteux. Au niveau des (U1) en automne, le pourcentage de limon est compris entre 0.07% et 0.24% et est entre 0.45% et 1.98% au printemps. Pour les (U2) le pourcentage de limon se situe entre 0.23% et 1.63%, et est entre 0.59% et 2.16 % % au printemps. Dans les (U3) en automne, les pourcentages des limons varient entre 0.21% et 1.33%, et sont entre 0.95% et 4.15 % au printemps. Au niveau des petits plateaux caillouteux, l'analyse granulométriques a montré qu'en automne, le pourcentage de limon appartient à un intervalle allant de 0.21% à 2.6%, et est entre 1.11% et 11.2% au printemps. Les (U5) donnent en automne, un pourcentage de limon compris entre 0.60% et 0.94 %, et se situe entre 0.7% et 1.72 % au printemps. (Figure 25).

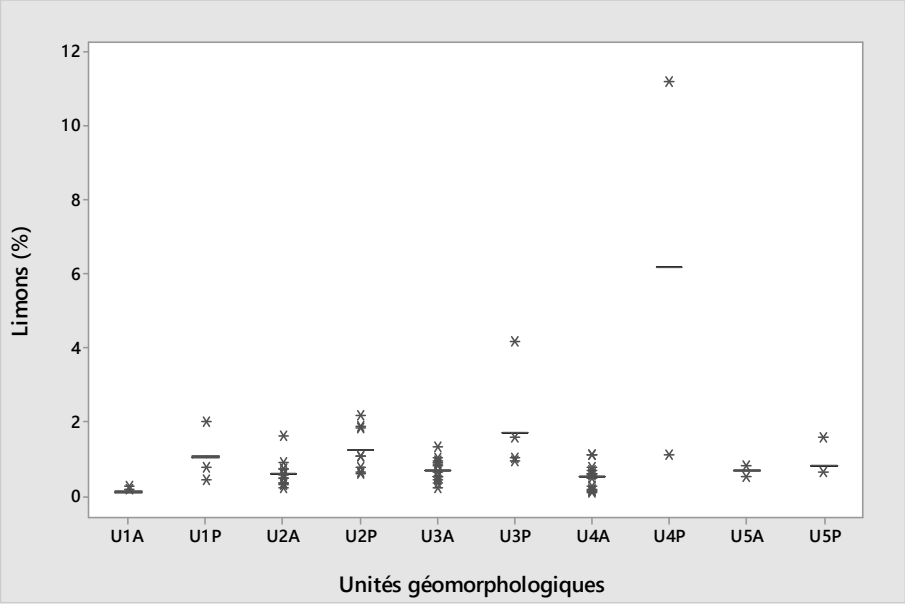


Figure 25 : Evolution du pourcentage de la fraction limoneuse au niveau des unités géomorphologiques en automne (A) et au printemps (P).

4.1.3. Argiles

Les valeurs des pourcentages de l'argile montrent en (Figure 26) qu'au niveau des (U1) en automne, le pourcentage de l'argile montre des valeurs incluses entre 0.07% et 0.15% et est entre 0.07% et 0.35% au printemps. Pour les (U2) le pourcentage de l'argile est compris entre 0.099% et 0.70 %, et est entre 0.195% et 0.72 % au printemps. Dans les (U3) en automne, les pourcentages de l'argile varient entre 0.14% et 0.88%, et sont entre 0.63% et 2.77% au printemps. Au niveau des petits plateaux caillouteux, l'analyse granulométriques a montré qu'en automne, le pourcentage de l'argile est situé entre 0.09% et 1.16%, et est entre 0.47% et 4.8 % au printemps. Les (U5) donnent en automne, un pourcentage de l'argile compris entre 0.26% et 0.40%, et se situe entre 0.3 % et 0.73 % au printemps. (Figure 26). Les (U1) présentent la fraction argileuse la moins importante 0,07%, alors que le maximum de la fraction argileuse est de 4,8%, il est observé au niveau des petits plateaux caillouteux.

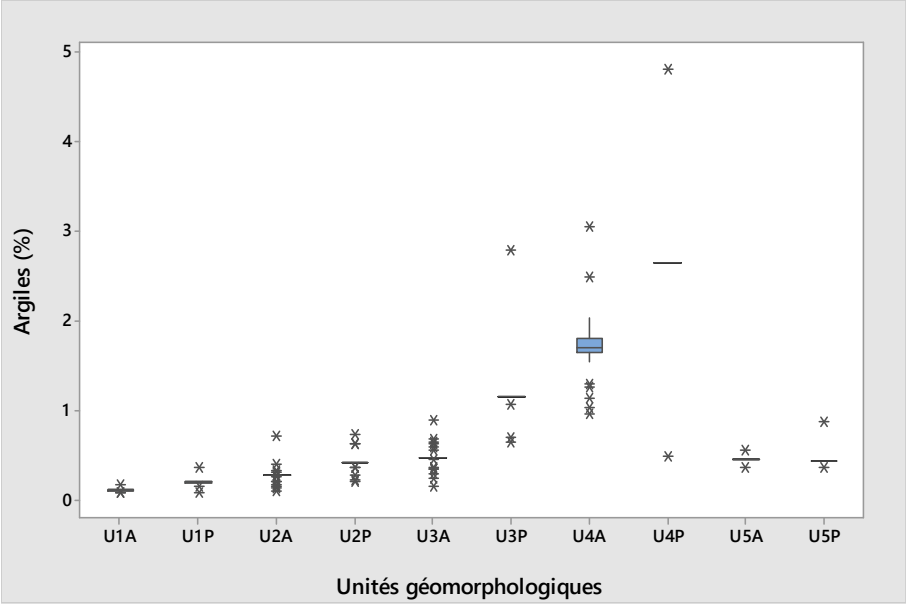


Figure 26 : Evolution du pourcentage de la fraction argileuse au niveau des unités géomorphologiques en automne (A) et au printemps (P).

4.1.4. La fraction erodible du sol (FE)

Un minimum de la fraction Erodible est (0,80%) est donné par les parcelles cultivées, alors que le maximum est de 0,99% est observé au niveau des (U1) (Figure 27). Au niveau des dunes peu végétalisées, la fraction erodible oscille de 0.96% à 0.99% en automne, et est entre 0.97% et 0.98% au printemps. Au niveau des steppes ensablées, la valeur de la fraction erodible varie de 0.87% à 0.99% en automne, et est de 0,93% à 0.99% au

printemps. Sur les parcelles cultivées, la fraction erodible est variable de 0.80% à 0.99% en automne, et est de 0.89% à 0.97% au printemps. Au niveau des petits plateaux caillouteux, la fraction erodible est comprise entre 0.90% et 0.97% en automne, et est entre 0.89% à 0.95% au printemps. En automne, les (U5) donnent des valeurs de la fraction erodible qui se situent entre 0.89% et 0.96% en automne, et est entre 0.93% et 0.98% au printemps.

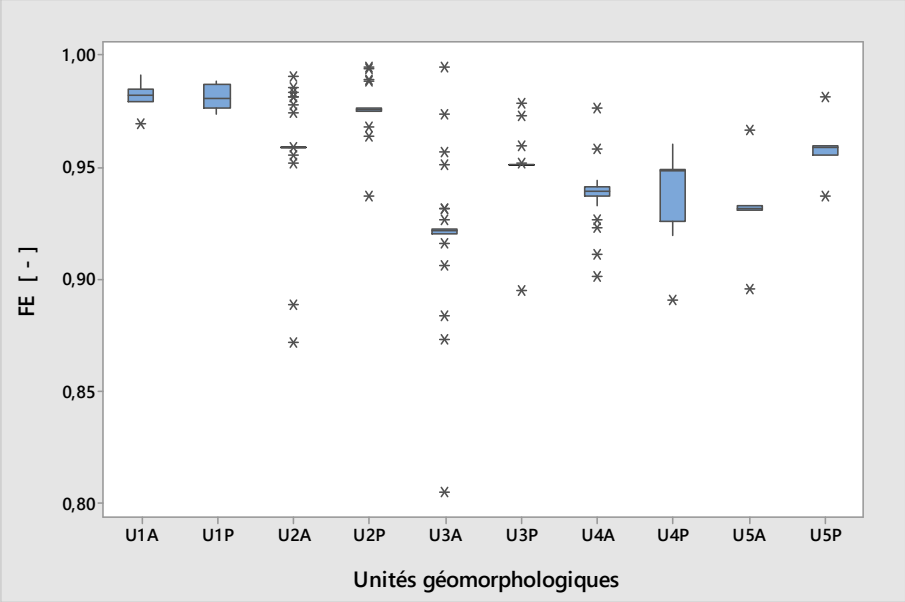


Figure 27 : Evolution du pourcentage de la fraction erodible au niveau des unités géomorphologiques en automne (A) et au printemps (P).

4.2. Matières organiques

Les pourcentages de la matière organique mesurée dans la couche superficielle du sol au niveau des unités géomorphologiques sont présentés en (Figure 28). Le taux minimal de matières organiques 0.29% est mesuré dans les parcelles cultivées, alors que le taux maximale est de 5.69% est mesuré au niveau des petits plateaux caillouteux. Les chiffres indiquent qu'au niveau des (U1) en automne, le pourcentage de la matière organique est compris entre 1.23% et 1.98% et est entre 2 % et 3.87% au printemps. Pour les (U2) le pourcentage de la matière organique est dans un intervalle entre 0.63% et 2.01% en automne, et est entre 1.07% et 5.76% au printemps. Dans les (U3) en automne, les pourcentages de la matière organique sont entre 0.80% et 2.81%, et sont compris entre 0.29% et 4.71% au printemps. Au niveau des petits plateaux caillouteux, l'analyse a montré qu'en automne, le pourcentage de la matière organique est situé entre 0.95% et 3.03%, et est entre 3.55% et 5.69% au printemps. Les (U5) donnent en automne, un

pourcentage de la matière organique entre 1.2% et 1.47%, et se situe entre 1.53% et 5.67% au printemps (Figure 28).

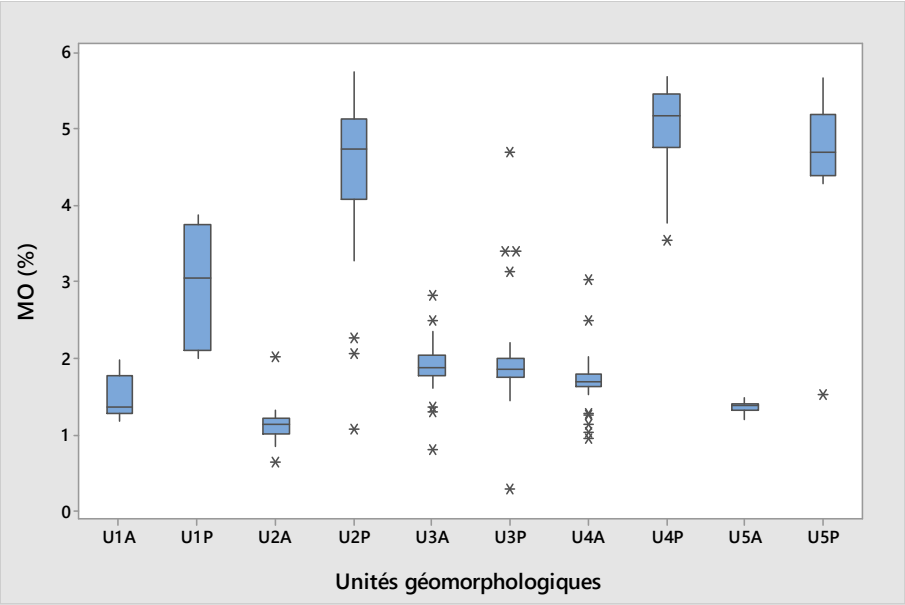


Figure 28 : Evolution du pourcentage de la matière organique au niveau des unités géomorphologiques en automne (A) et au printemps (P).

4.3. Les carbonates de calcium

La Figure 29 montre l'évolution des carbonates de calcium dans la couche superficielle du sol au niveau des unités géomorphologiques dans Mokrane. Nous mesurons au niveau des (U1) en automne, un pourcentage des carbonates de calcium compris entre 2.46 et 3.93% et est entre 2.46 et 4.91% au printemps. Pour les (U2) le pourcentage des carbonates de calcium varie de 1.97 à 4.92% en automne, et est varie de 2.46 à 4.90% au printemps. Dans les (U3) en automne, les pourcentages des carbonates de calcium sont variables entre 1.97% et 5.71%, et sont entre 2.46% et 3.93% au printemps. Au niveau des petits plateaux caillouteux, l'analyse a montré qu'en automne, le pourcentage des carbonates de calcium est situé entre 0.98 et 5.56%, et est entre 3.44% et 4.89% au printemps. Les (U5) donnent en automne, un pourcentage des carbonates de calcium compris entre 2.46% et 4.94%, et se situe entre 2.44% et 5.39% au printemps. Le taux minimum de carbonates de calcium 0,98 % est présent dans les petits plateaux caillouteux, alors que le maximum est de 5,56% est observé au niveau des (U4) (Figure 29).

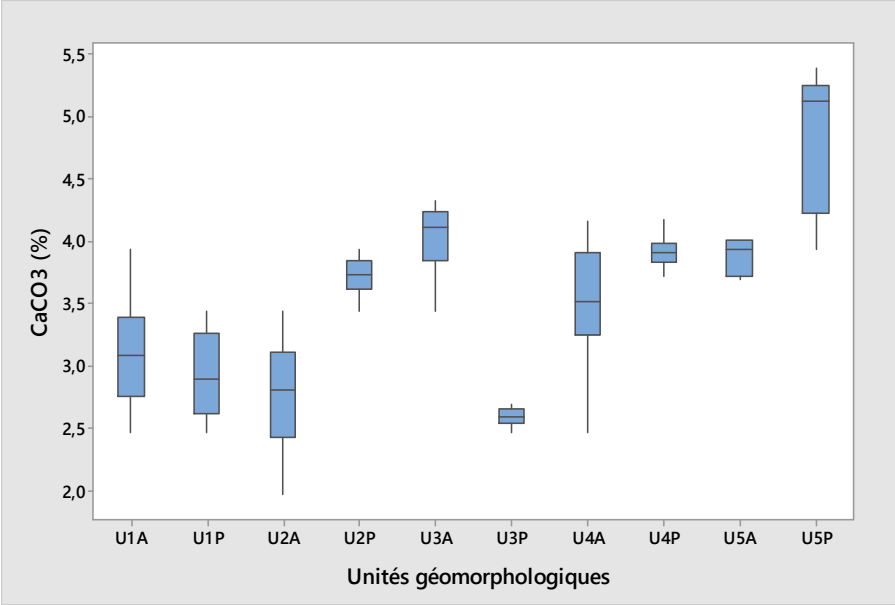


Figure 29 : Evolution du taux de carbonates de calcium au niveau des unités géomorphologiques en automne (A) et au printemps (P).

4.4. La couverture du sol

4.4.1. Pourcentage de la couverture végétales (CC)

Les valeurs de (CC) mesurées au niveau des unités géomorphologiques sont présentées en (Figure 30). Le minimum de la (CC) 0,083 % est mesuré dans les dunes peu végétalisées, alors que le maximum est de 20.92% est observé au niveau des steppes ensablées. Les (U1) présentent en automne des valeurs de (CC) comprises entre 0,083% et 0,23% et sont entre 0.25% et 0.97% au printemps. Pour les (U2) la (CC) est comprise entre 3.66% et 12.03% en automne, et est entre 5.76% et 20.92% au printemps. Dans les (U3) en automne, les valeurs des (CC) sont variables de 0.40% à 0.60%, et dans un intervalle entre 1.1% et 1.5% au printemps. Au niveau des petits plateaux caillouteux, les mesures donnent en automne une (CC) située entre 7.76% et 9.43 %, et est entre 10.97% et 12.17% au printemps. Les (U5) donnent en automne, des valeurs de (CC) qui oscillent entre 11.73% et 12.42 %, et se situe entre 12.07% et 12.71% au printemps.

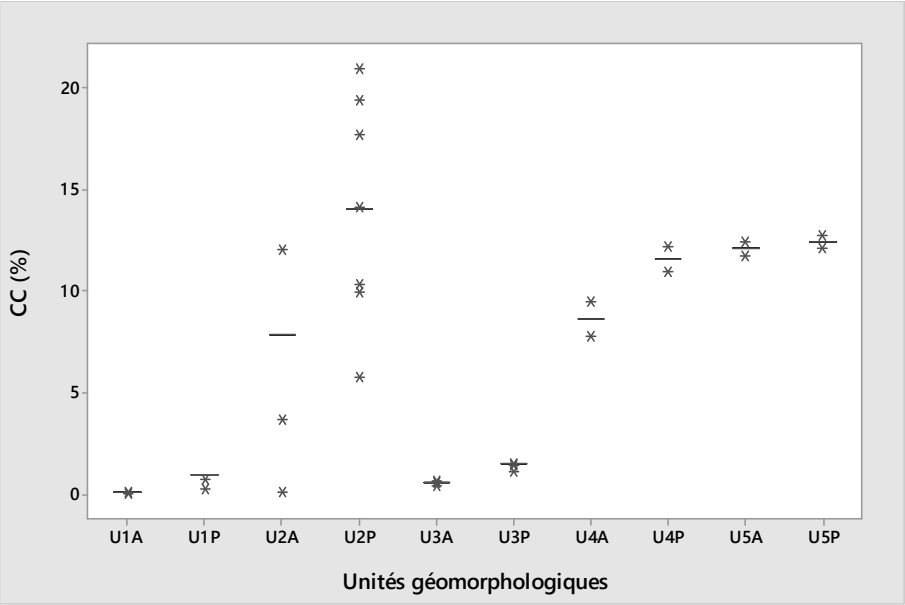


Figure 30 : Evolution du pourcentage de la couverture végétale (CC) au niveau des unités géomorphologiques en automne (A) et au printemps (P).

4.4.2. Pourcentage de la couverture par les résidus plats et la charge caillouteuses (SC)

La Figure 31 montre l'évolution du pourcentage de la couverture par des résidus plats et la charge caillouteuse (Flat residue : SC) dans les unités géomorphologiques. Les (U1) présentent en automne, une valeur de (SC) comprise entre 0.1% et 0.89%, mais au printemps cette valeur est nulle. Pour les (U2) la valeur de (SC) est comprise entre 4.4% et 34.83% en automne, et est entre 5.12% et 12.8 % au printemps. Dans les (U3) en automne, les valeur des (SC) varient de 2.88% à 46.56%, et sont entre 0 % et 19.20% au printemps. Au niveau des petits plateaux caillouteux, les mesures donnent automne, une valeur de (SC) située entre 4,78% et 76.56%, et est entre 3.04% et 77.92 % au printemps. Les (U5) donnent en automne, une valeur de (SC) entre 28.14% et 32.22%, et se situe entre 6.56% et 17.92 % au printemps. Le minimum du (SC) est une valeur nulle, elle est présente dans les dunes peu végétalisées, alors que le maximum est de 77,92% est mesuré au niveau des petits plateaux caillouteux.

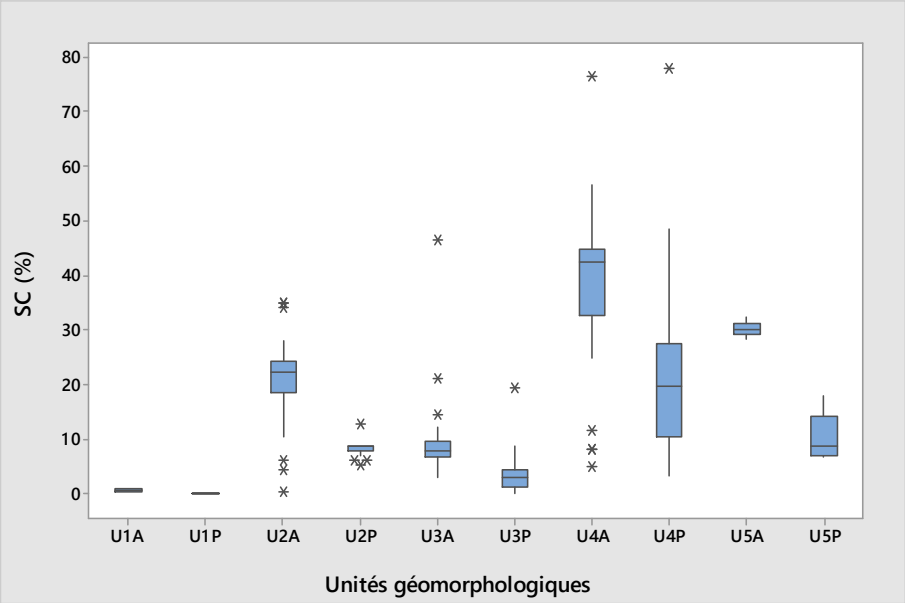


Figure 31 : Evolution du pourcentage de la couverture du sol (SC) par les résidus plats et la charge caillouteuse au niveau des unités géomorphologiques en automne (A) et au printemps (P).

4.4.3. Pourcentage de la couverture par la silhouette des plants sur pieds (standing residues : SA)

La Figure 32 présente les valeurs de (SA) mesurées au niveau des unités géomorphologiques. Nous remarquons qu'au niveau des (U1) en automne, la valeur de (SA) varie de 0.49 % à 1.32 %, et est de 0.58 à et 1.44 % au printemps. Pour les (U2) la valeur de (SA) est comprise entre 20.5 % et 65.32 % en automne, et est entre 40.32 % et 275.02 % au printemps. Dans les (U3) en automne, les valeurs des (SA) sont variable entre 2.47 % et 4.38 %, et sont entre 13.55 % et 19.61 % au printemps. Au niveau des petits plateaux caillouteux, l'analyse a montré qu'en automne, la valeur de (SA) est située entre 124.34 % et 137.37 %, et est entre 140.75 % et 154.49 % au printemps. Les (U5) donnent en automne, une valeur de (SA) entre 80.78% et 85.53 %, et se situe entre 82.71 % et 84.91 % au printemps. Ces chiffres montrent que le minimum de la fraction est de 0.49 %, elle est donnée par les dunes peu végétalisées, alors que le maximum est de 154.49 % est observé au niveau des petits plateaux caillouteux.

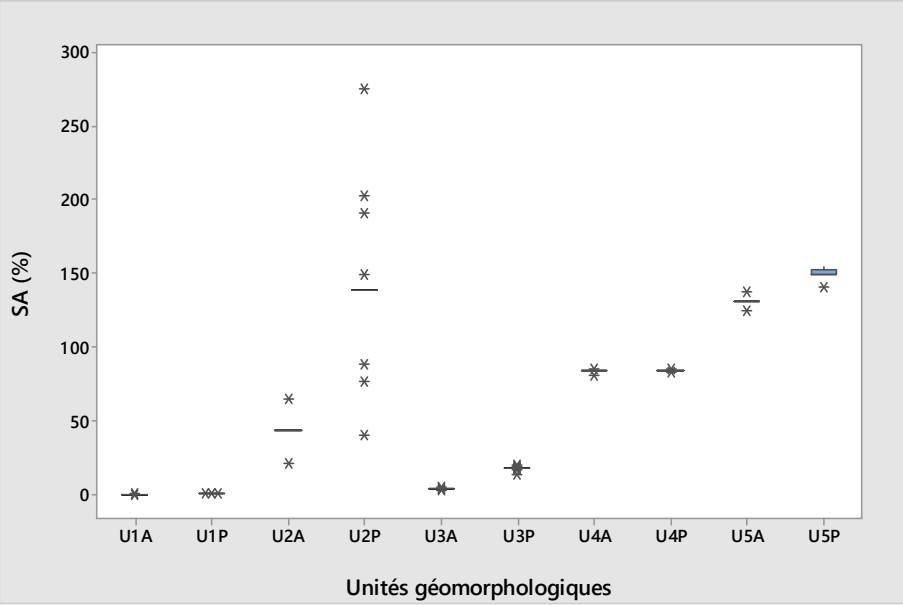


Figure 32 : Evolution de la silhouette (SA) au niveau des unités géomorphologiques en automne (A) et au printemps (P).

4.5. Analyses de la variance des paramètres mesurés durant les deux saisons

Tous les paramètres qui ont étés présentés ci-dessus, qui concernent le sol et sa couverture végétale qu'ils soient mesurés sur le terrain ou bien analysés aux laboratoires ont subit des analyses de la variance. Le test ANOVA au seuil de 5% a été effectué avec le logiciel (Minitab.17). Les résultats du test révèlent à chaque fois un (P=0,000) pour chacun de l'ensemble des paramètres testés à l'exception des sables en automne. Les hypothèses nulles que les paramètres mesurés ou analysés au niveau des unités géomorphologiques ne présentent pas de divergence a été à chaque fois rejetée. Des lors il semble que le type d'unité géomorphologique présentent un effet significatif sur tous les paramètres relatifs au sol et à sa couvertures mesurés au terrain ou analysés aux laboratoires, à l'exception de la fraction sableuse au automne qui donne un P= 0.72 (Tableau 7).

Tableau 7: Résultats de l'analyse de la variance des paramètres du sol et sa couverture.

Facteur	SC	ddl	MC	F	P
% des sables (A)	160,6	4	40,15	0,51	0,720
Erreur	9377,6	119	78,8		
Total	9538,2	123			
% des limons (A)	2,879	4	0,719	20,06	0,000
Erreur	4,270	119	0,035		
Total	7,149	123			
% des argiles (A)	47,112	4	11,77	261,29	0,000
Erreur	5,364	119	0,045		
Total	52,476	123			
% des F E (A)	0,043	4	0,01	24,68	0,000
Erreur	0,051	119	0,00043		
Total	0,094	123			
MO % (A)	11,87	4	2,96	32,73	0,000
Erreur	10,79	119	0,09		
Total	22,66	123			
Caco3% (A)	29,93	4	7,34	13,15	0,000
Erreur	66,49	119	0,55		
Total	95,87	123			
Rugosité K' (A)	15,6	4	3,89	38,33	0,000
Erreur	12,11	119	0,1		
Total	27,7	123			
CC % (A)	2041,23	4	510,3	637,33	0,000
Erreur	95,28	119	0,8		
Total	2136,51	123			
SC % (A)	19463	4	4865,84	54,99	0,000
Erreur	10529	119	88,48		
Total	29992	123			
SA % (A)	194068	4	48517,1	5239,59	0,000
Erreur	1102	119	9,3		
Total	195170	123			
% des sables (P)	1146,9	4	286,72	260,07	0,000
Erreur	131,2	119	1,102		
Total	1278,1	123			
% des limons (P)	566,47	4	141,61	296,94	0,000
Erreur	62,43	119	0,52		
Total	628,9	123			
% des argiles (P)	106,21	4	26,55	243,81	0,000
Erreur	12,96	119	0,1		
Total	119,18	123			
% des F E (P)	0,029	4	0,0072	56,21	0,000
Erreur	0,015	119	0,00012		
Total	0,044	123			
MO % (P)	48,84	4	12,21	66,61	0,000
Erreur	21,81	119	0,18		
Total	70,66	123			
Caco3% (P)	192,94	4	48,23	71,19	0,000
Erreur	80,62	119	0,67		
Total	273,57	123			
Rugosité K' (P)	18,54	4	4,63	30,82	0,000
Erreur	17,9	119	0,15		
Total	36,44	123			
CC % (P)	9330,8	4	982,69	614,57	0,000
Erreur	190,3	119	1,59		
Total	4121,1	123			
SC % (P)	7489	4	1872,18	26,59	0,000
Erreur	8379	119	70,41		
Total	15868	123			
SA % (P)	3707114	4	92678,5	263,7	0,000
Erreur	41823	119	351,5		
Total	412537	123			

5. Les paramètres entrants dans le modèle RWEQ

5.1. La rugosité du sol (K')

La figure 33 montre que les valeurs de la rugosité sont variables pour les cinq unités géomorphologiques, elles sont situées entre 0,53 et 2.98, les (U1) présentent la valeur la plus basse, alors que les (U4) pressentent la valeur la plus importante. Au niveau des (U1) la valeur de la rugosité oscille de 0.92 cm à 1.09 cm en automne, et est de 0.76 cm à 1,03 cm au printemps. Pour les steppes ensablées, les valeurs de la rugosité sont variables de 0.87 cm à 2.17 cm en automne, et sont situées entre 0.86 cm à 2.32 cm au printemps. Les valeurs de la rugosité sont comprises entre 1.29 cm et 2.98 cm en automne, et sont de 0.88 cm à 2.98 cm au printemps pour les petits plateaux caillouteux. Pour les (U3) et les petits espaces encroûtées, Les valeurs de la rugosité varient de 0,72 cm à 1.53 cm, et de 0,53 cm à 1.19 cm en automne; et elles sont variables de 0.67 cm à 1.13 cm en automne, et de 0.56 cm à 1.02 cm au printemps respectivement.

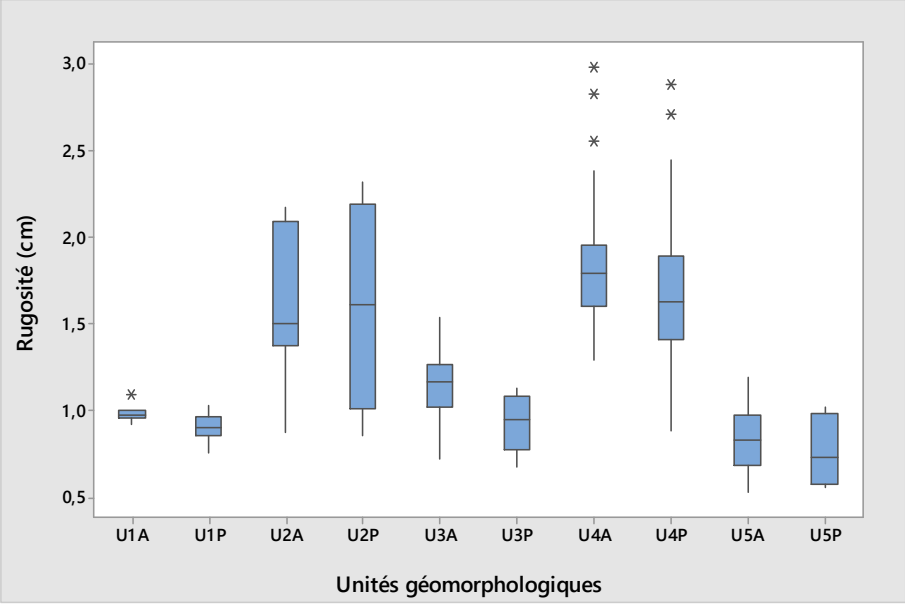


Figure 33: Evolution de la rugosité (*K'* mesurée) au niveau des unités géomorphologiques en automne (A) et au printemps (P).

5.2. Facteur erodible (EF)

La plus faible valeur est observée au niveau des petits plateaux caillouteux, elle est de 0,46 alors que la plus importante valeur est présente au niveau des (U1) 21,33 (figure 34). En automne, Le facteur erodible oscille de 1.66 à 1.45, au printemps, il est entre 1.45 et 21.33 dans les dunes peu végétalisées. Au niveau des steppes ensablées, le facteur erodible varie

de 1.67 à 10.26 en automne, et est de 1.40 à 4.44 au printemps. Au niveau des parcelles cultivées, le facteur erodible est variable de 1.75 à 9.69 en automne, et est de 0.74 à 2.34 au printemps. Au niveau des petits plateaux caillouteux, le facteur erodible est compris entre 1.15 à 11.26 en automne, et est entre 0.46 à 2.33 au printemps. En automne, les (U5) donnent des valeurs du facteur erodible qui se situent entre 2.70 et 4.05 en automne, et est entre 1.60 et 3.56 au printemps.

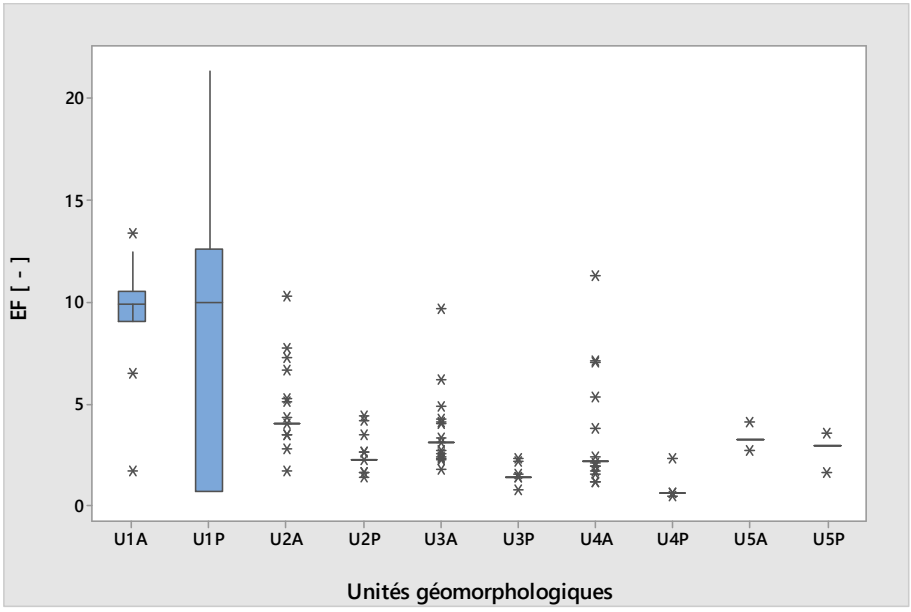


Figure 34: Evolution du facteur erodible (*EF*) au niveau des unités géomorphologiques en automne (A) et au printemps (P).

5.3. Le facteur d'encroutement (SCF)

La figure 35 montre que pour les cinq unités géomorphologiques, le facteur d'encroutement (*SCF*) présente des valeurs très proches de l, en automne et au printemps.

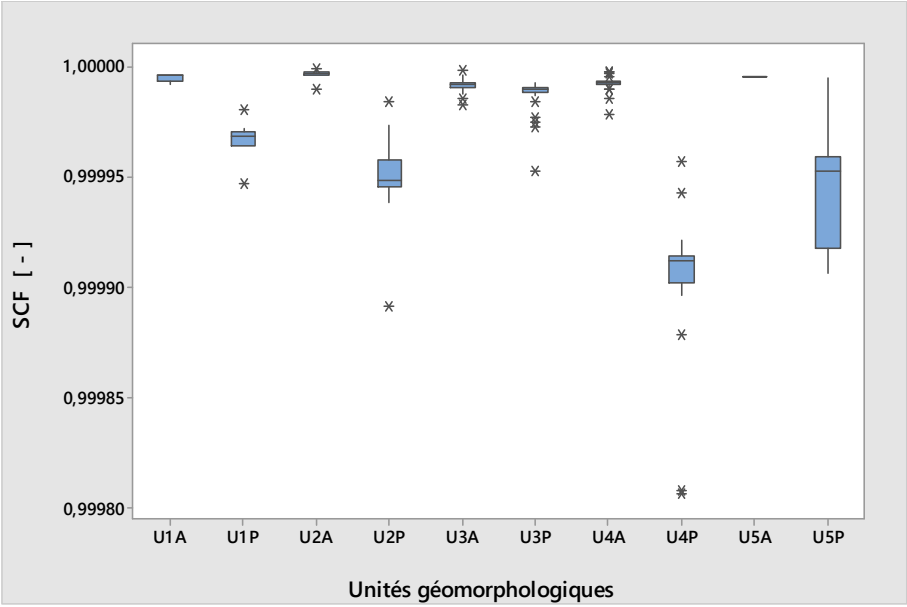


Figure 35 : Evolution du facteur d'encroûtement (*SCF*) au niveau des unités géomorphologiques en automne (A) et au printemps (P).

5.4. Le facteur de la couverture du sol (COG)

Les résultats des coefficients de perte en sol liés à la couverture végétale (SLR_c), couverture par les résidus plats (SLR_f) et la silhouette (SLR_s) sont presentés au niveau des l'annexes 4, 5, 6, 7 et 8. Ils ont permis le calcul du facteur de la couverture (*COG*) (Figure 36). Le facteur de la couverture du sol (*COG*) au niveau des unités géomorphologique est présenté en (Figure 36), le minimum de la (*COG*) est mesuré dans les (U5) 0.12, alors que le maximum est de 0,99 est observé au niveau des dunes peu végétalisées. Sur les (U1) en automne, la valeur de *COG* est comprise entre 0.96 à 0.99, et est entre 0.81 à 0.93 au printemps. Les (U2) donnent des valeurs du *COG* qui oscillent entre 0.18 et 0.48 en automne, et sont entre 0.05 et 0.35 au printemps. Dans les (U3) en automne, les valeurs de *COG* varient entre 0.80 à 0.85, et sont entre 0.62 à 0.68 au printemps. Au niveau des petits plateaux caillouteux, l'analyse a montré qu'en automne, une valeur de *COG* située entre 0.20 à 0.24, et elle est située entre 0.16 à 0.17 au printemps. Les (U5) donnent en automne, une valeur de *COG* entre 0.13 à 0.15 et se situe entre 0.12 à 0.13 au printemps.

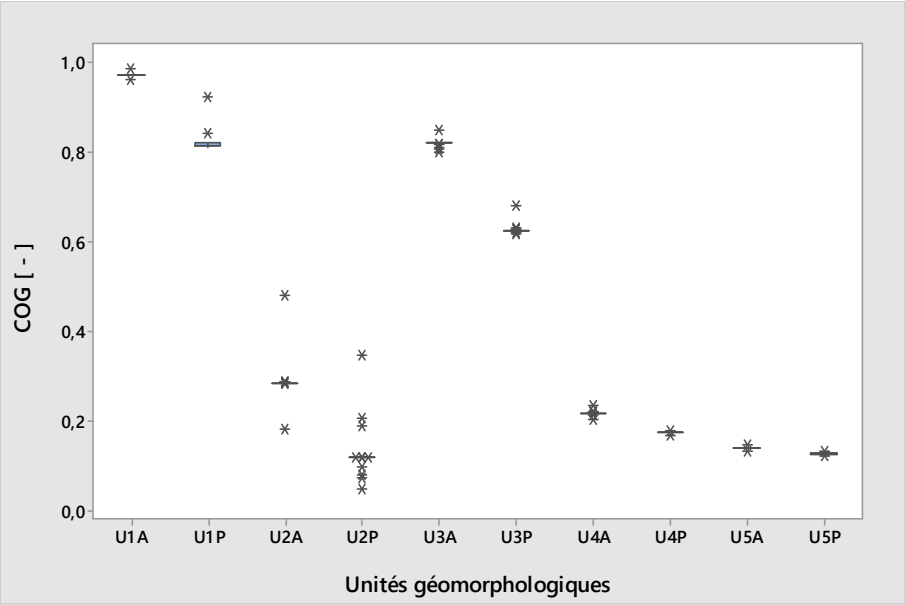


Figure 36 : Evolution du facteur de la couverture du sol (*COG*) au niveau des unités géomorphologiques en automne (A) et au printemps (P).

5.5. Le facteur climatique (WF)

Le facteur climatique est relativement plus faible en automne qu'au printemps. Toutefois l'écart entre les deux valeurs n'est pas très important (Tableau 8).

Tableau 8 : Facteur climatique.

Facteur climatique en automne (Autum Weather Factor)	Facteur climatique au printemps (Spring Weather Factor)
3,28	**4,14**

6. La capacité de transport maximale des sédiments (Qmax)

Les paramètres entrées dans *RWEQ* sont (*FE*, *SCF*, WF, *COG*, et *K'*), Après les avoir introduit dans le modèle, nous avons estimé la capacité maximale du transport (Q_{max}), les valeurs obtenues sont présentées dans (Figure 37). Il est à noter que nous avons utilisé la fraction erodible (mesure directe).

La capacité maximale du transport en automne est variable pour l'ensemble des points, elle prend des valeurs situées entre 30.98 kg/m et 419.65 (kg/m). Au printemps, la capacité maximale du transport est comprise entre 30.87 kg/m et 363.41 kg/m. Sur les (U1) *Qmax* varient de 318.67 (kg/m) à 379.73 (kg/m) en automne, et sont de 309.12 (kg/m) à 363.41 (kg/m) au printemps. Au niveau des steppes ensablées, Les valeurs du *Qmax* oscillent de 85.46 à 360.81 (kg/m) en automne, et sont de 41.68 kg/m) à 230.85 (kg/m) au printemps dans les steppes ensablées. Quant aux parcelles cultivées, La valeur du *Qmax* est variable de 195.74 (kg/m) à 419.65 (kg/m) en automne, et est de 146.68 (kg/m) à 322.58 (kg/m) au printemps. Au niveau petits plateaux caillouteux, les valeurs du *Qmax* se situent entre 74.38 (kg/m) et 210.39 (kg/m) en automne, et entre de 66.81 et 201.08 (kg/m) au printemps. Les valeurs du *Qmax* sont comprises entre 30.98 (kg/m) et 52.27 (kg/m) en automne, et sont entre 30.85 (kg/m) et 56.25 (kg/m) au printemps pour les petits espaces encroûtés. (Figure 37).

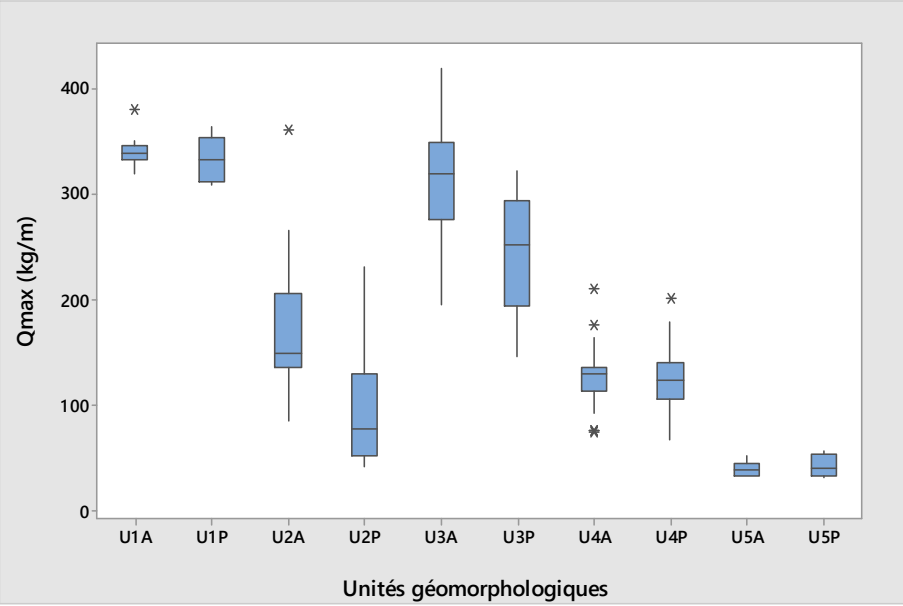


Figure 37 : Evolution de la capacité de transport maximale au niveau des unités géomorphologiques en automne (A) et au printemps (P).

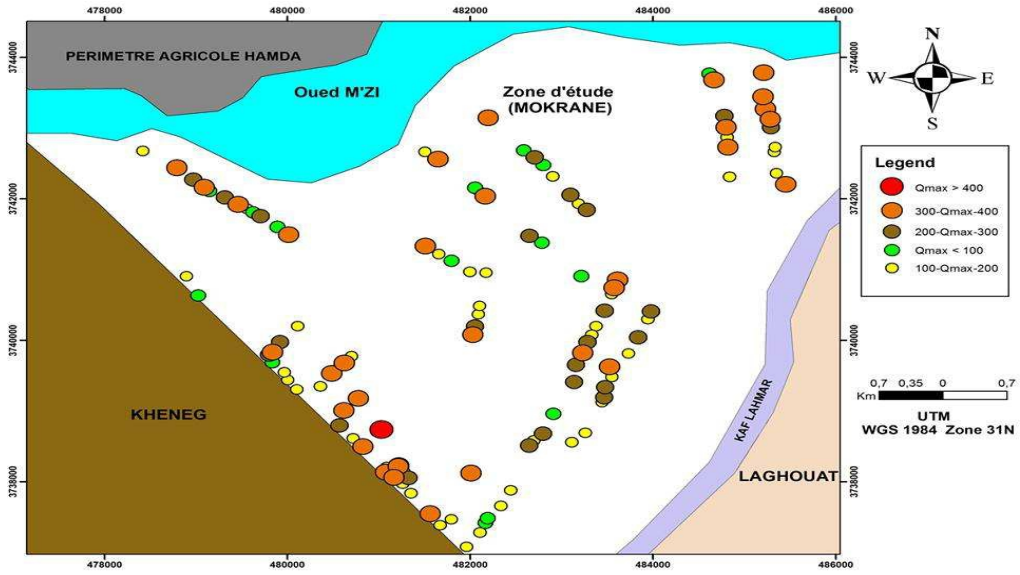
Le test ANOVA effectué au seuil de 5% sur les capacités maximales du transport *Qmax* a révélé une différence significative de la capacité de transport dans les unités géomorphologiques (P=0,000). Il semble que l'effet de l'unité géomorphologique sur la capacité max du transport est significatif. (Tableau 9)

Tableau 9 : Résultats de l'analyse de la variance du *Qmax* pour les deux saisons.

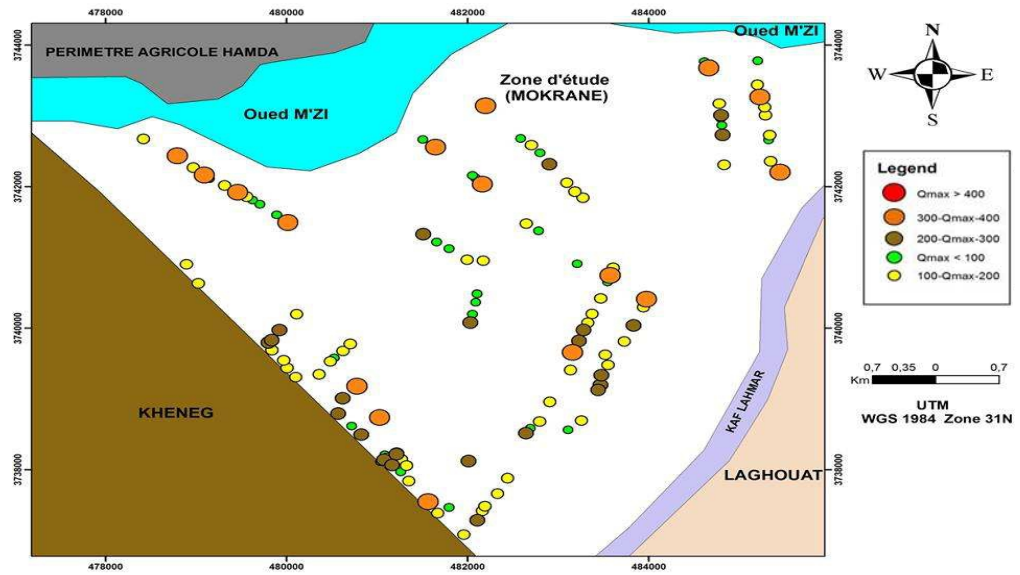
Facteur	SC	ddl	MC	F	P
Q_{max} (A)	1072867	4	268217	142,91	0,000
Erreur	223348	119	1877		
Total	1296215	123			
Q_{max} (P)	863329	4	215832	124,28	0,000
Erreur	206665	119	1737		
Total	1069986	123			

6.1. Sensibilité de Mokrane à l'érosion éolienne estimée par *RWEQ*.

Afin de tracer la carte de la répartition des *Qmax*, nous avons formé cinq classes de flux estimés (Figure 38). A priori dans une même classe de flux, nous retrouvons toutes les unités géomorphologiques présentent. Les grandeurs des flux ne sont pas spécifiques aux unités géomorphologiques. Les limites de notre site d'étude sont : la rive d'Oued M'zi au nord, Djebel Lahmar à l'est, et la ligne du Gazoduc (commune de Kheneg) frontière ouest. Les flux estimés par *RWEQ* au cours des deux saisons sont répartis dans la zone de Mokrane de façon hétérogène (Figure 38). L'ensemble des classes de flux que nous avons formé sont repérées sur l'ensemble de la surface de la zone. Aucune concentration de classe particulière n'est observée. La classes des flux dépassant les 100 kg /m est observée à travers toute la superficie de Mokrane et durant les deux saisons de mesures. Aussi bien pour la classe des flux inférieurs à 400 kg/m qui sont partout distribués entre les limites de la zone. Les mêmes observations concernent aussi les autres des flux et durant les deux saisons de l'année.



(a) Répartition du *Qmax* en automne.



(b) Répartition de *Qmax* au printemps.

Figure 38 : Répartition de la capacité maximale du transport *Qmax(kg/m)* dans Mokrane en haut en automne , en bas au printemps (Carte de la sensibilité de la zone à l'érosion éolienne).

7. Analyses des résultats

Afin de voir le comportement dans la zone de Mokrane vis-à-vis de l'érosion éolienne et les facteurs les plus déterminants dans la capacité maximale du transport, nous avons procédé à des analyses de sensibilité par régression linéaire. Ces analyses ont été *effectuées* sur l'ensemble des paramètres entrants intervenants dans le modèle *RWEQ*. D'abord nous avons procédé aux analyses de sensibilité sur l'ensemble des estimations (Globaux) sans faire la distinction entre les unités géomorphologiques. Par la suite nous avons séparé les estimations de chacune des unités géomorphologique, à ce moment nous avons effectué des analyses de sensibilité par régression linéaire entre les paramètres entrants dans *RWEQ* et la capacité maximale du transport Q_{max} en considérant les données de chacune des unités géomorphologiques séparément.

7.1. Comparaison entre la capacité maximale du transport (Qmax) en automne et au printemps

7.1.1. Comparaison entre la capacité maximale du transport (Qmax) en automne et au printemps, pour l'ensemble des points de mesure.

La Comparaison entre le *Qmax* pour la totalité des points est sensiblement une droite (figure 39). Nous remarquons aussi que l'ensemble des points sont moyennement corrélé (R^2= 0,62).

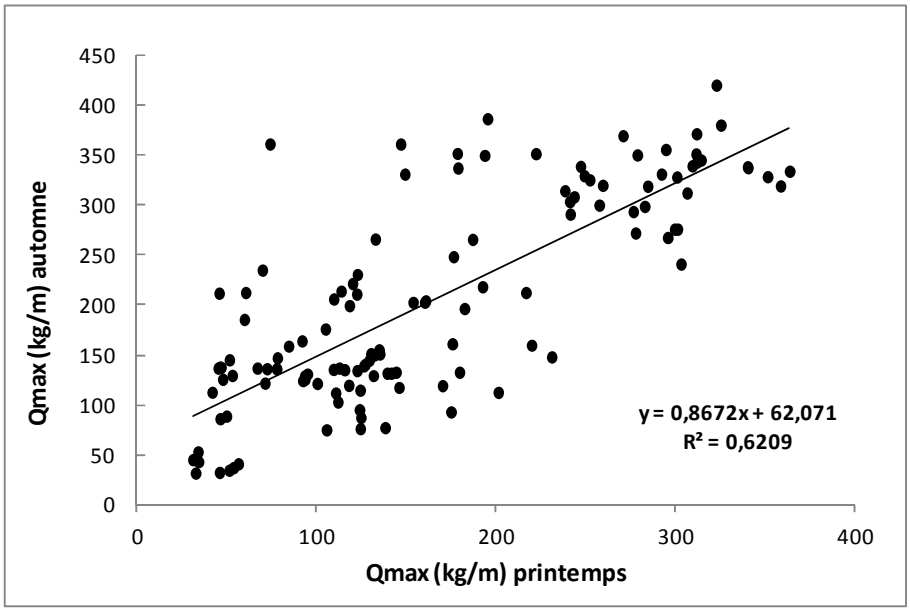


Figure 39 : Comparaison entre *Qmax* de l'automne et du *Qmax* du printemps pour toutes les unités géomorphologiques (Globale)

7.1.2. Comparaison entre la capacité maximale du transport (Qmax) en automne et au printemps, pour chaque unité géomorphologique

La figure 40 présente les Comparaison s entre les capacités de transport maximales durant les deux saisons pour chaque unité géomorphologique séparément. L'ensemble des points sont faiblement corrélé au niveau des unités géomorphologiques. Les coefficients de détermination sont compris entre un maximum de 0,29 et un minimum de 0,01. La valeur la plus élevé de ce coefficient est 0,29, observée pour les dunes peu végétalisées. Alors que la plus faible 0,01 valeur est notée pour les parcelles cultivées.

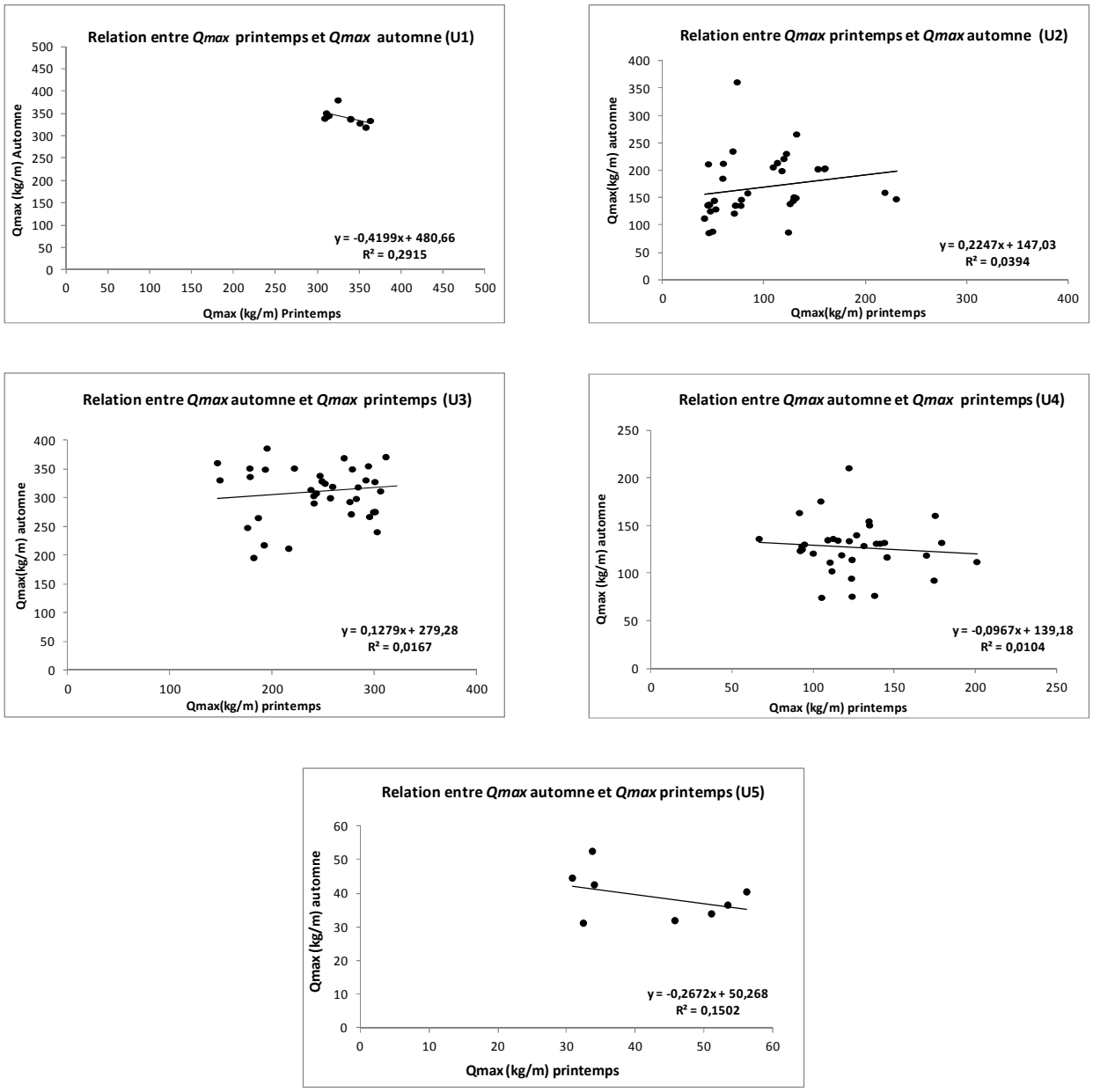


Figure 40 : Comparaison entre la capacité maximale du transport (*Qmax*) en automne et au printemps au niveau des unités géomorphologiques.

7.2. Comparaison entre la capacité maximale du transport (Qmax) et les paramètres de la RWEQ (K', EF, SCF, COG).

7.2.1. Comparaison entre la capacité maximale du transport (Qmax) et les paramètres de la RWEQ (K', EF, SCF, COG).), en automne et au printemps, pour l'ensemble des points.

Les Comparaison s entre le *Qmax* pour la totalité des points et les paramètres de la *RWEQ* sont sensiblement une droite au cours des deux saisons de mesures. L'ensemble des points pour les paramètres (*K'*, *EF* et *SCF*) sont très faiblement corrélé pour les deux saisons (R^2 varie entre une valeur infiniment faible <<1 et 0,07). Alors que pour *COG* les points présentent relativement une bonne corrélation (R^2 = 0.79 et R^2 =0,80) respectivement pour l'automne et le printemps. (Figure 41).

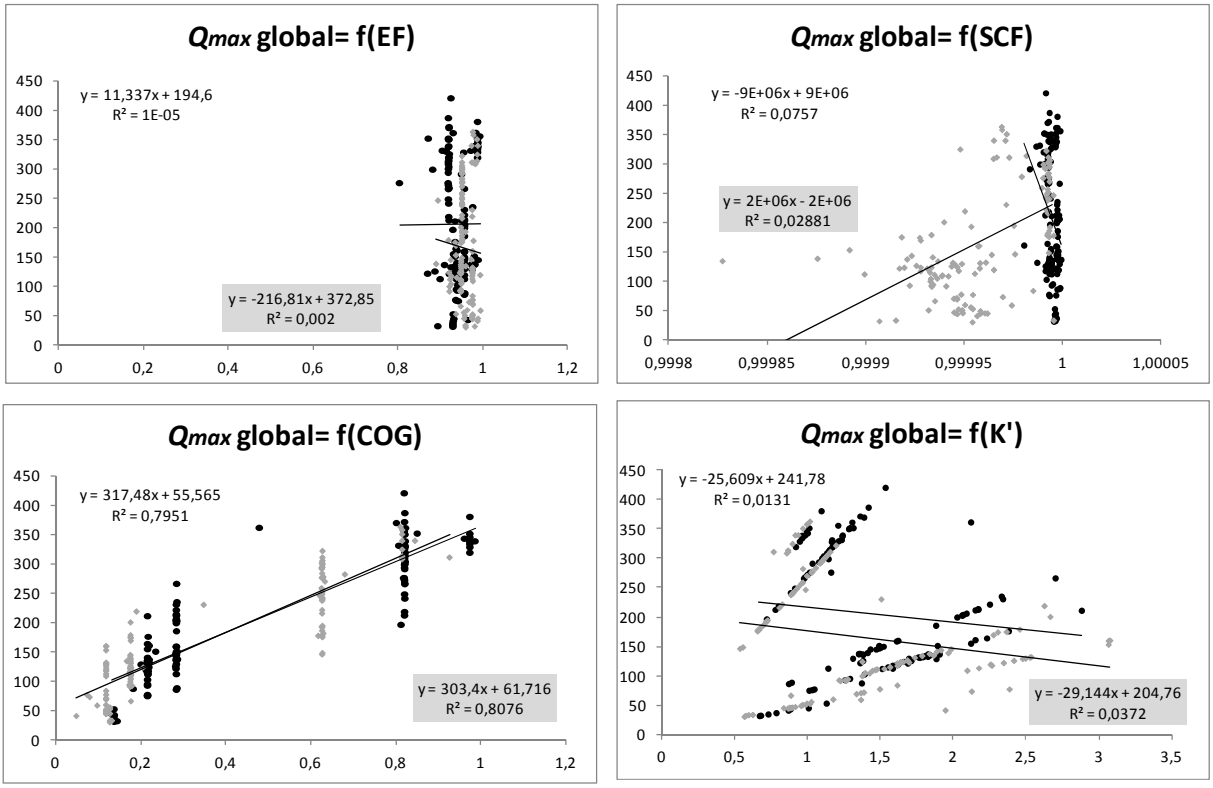


Figure 41 : Comparaison entre la capacité maximale du transport (*Qmax*) et les paramètres entrants dans *RWEQ* pour l'ensemble des points de mesure, en automne (noir) et au printemps (gris).

7.2.2. Comparaison entre la capacité maximale du transport (Qmax) et les paramètres de la RWEQ (K', EF, SCF, COG), en automne et au printemps au niveau des (U1) (U1)

Les Comparaison s entre le *Qmax* pour des (U1) et les paramètres de la *RWEQ* sont sensiblement une droite au cours des deux saisons de mesures. Nous remarquons que les

paramètres (*COG*, *EF* et *SCF*) sont très faiblement corrélés pour les deux saisons (R^2 varie entre une 0,0003et 0,02). Cependant pour *K'* les points présentent relativement une bonne corrélation (R^2= 0,84 et R^2 =0,98) respectivement pour l'automne et le printemps (Figure 42).

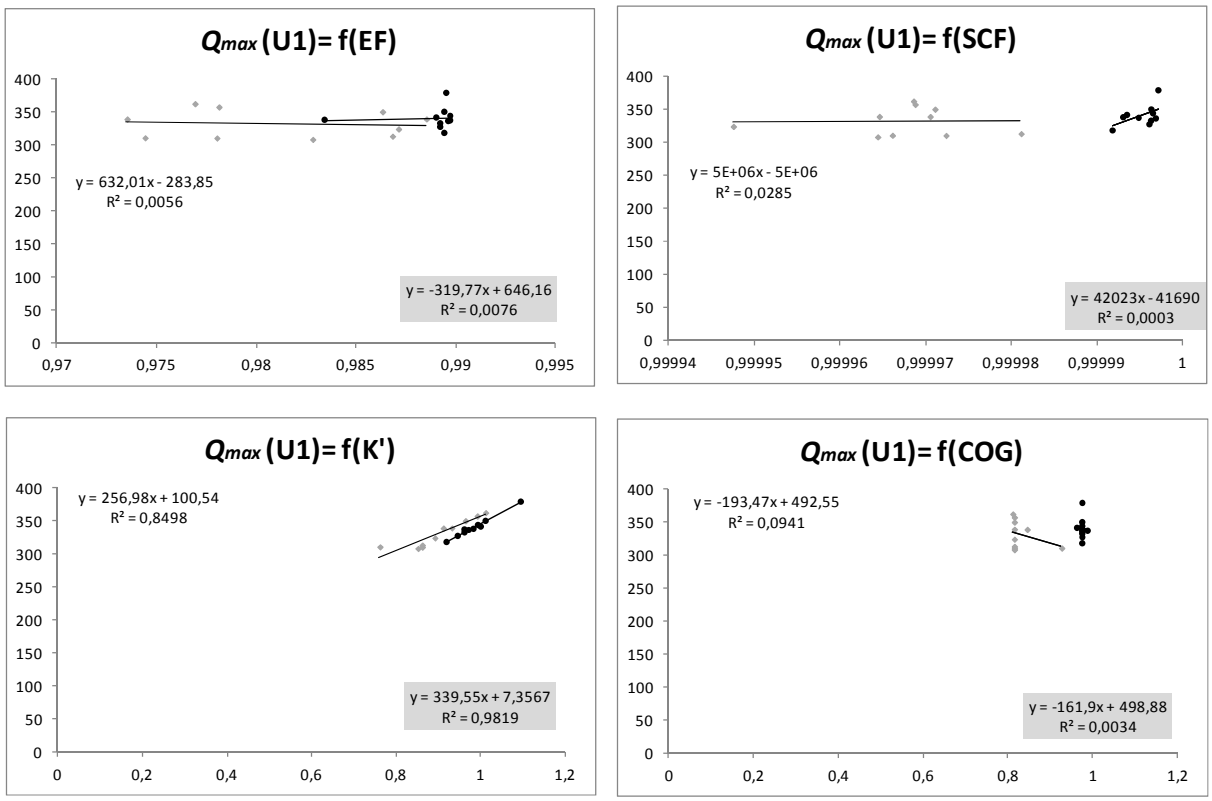


Figure 42 : Comparaison entre la capacité maximale du transport (*Qmax*) et les paramètres entrants dans *RWEQ* au niveau des dunes peu végétalisées, en automne (noir) et au printemps (gris)

7.2.3. Comparaison entre la capacité maximale du transport (Qmax) et les paramètres de la RWEQ (K', EF, SCF, COG), en automne et au printemps au niveau des (U2) (U2)

Les Comparaison s entre le *Qmax* pour les (U2) et les paramètres de la *RWEQ* sont sensiblement une droite au cours des deux saisons de mesures. L'ensemble des points pour les paramètres (*COG*, *EF* et *SCF*) sont très faiblement corrélé pour les deux saisons (R^2 varie entre 4.10^{-4} et 0,08). Alors que pour *K'* les points présentent relativement une bonne corrélation (R^2= 0,87et R^2 =0,82) respectivement pour l'automne et le printemps. (Figure 43).

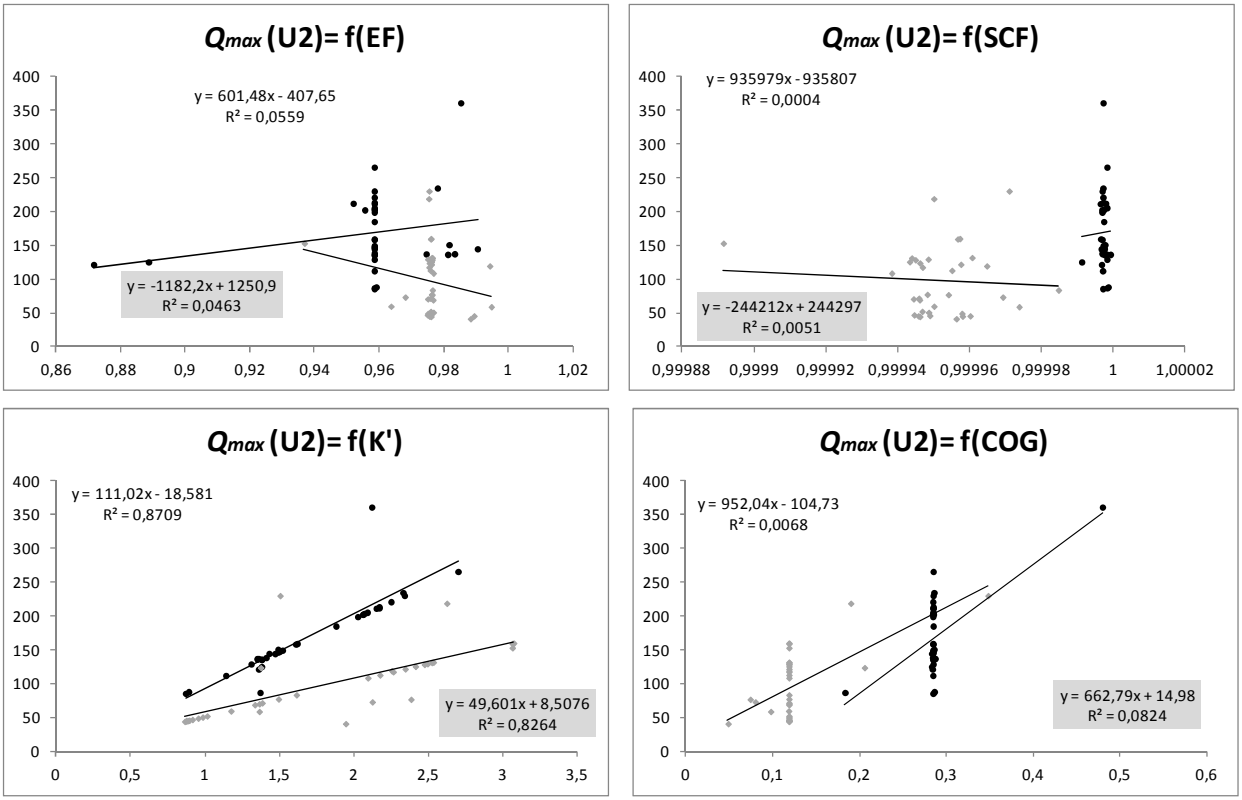


Figure 43 : Comparaison entre la capacité maximale du transport (*Qmax*) et les paramètres entrants dans *RWEQ* au niveau des steppes ensablées, en automne (noir) et au printemps (gris).

7.2.4. Comparaison entre la capacité maximale du transport (Qmax) et les paramètres de la RWEQ (K', EF, SCF, COG), en automne et au printemps au niveau des (U3) (U3)

Les Comparaison s entre le *Qmax* pour les (U3) et les paramètres de la *RWEQ* sont sensiblement une droite au cours des deux saisons de mesures. Les paramètres (*COG*, *EF* et *SCF*) sont très faiblement corrélés avec le *Qmax* pour les deux saisons (R^2 varie entre 0,007 et 0,07). Alors que pour *K'* les points présentent relativement une bonne corrélation ($R^2 = 0,96$ et $R^2 = 0,99$) respectivement pour l'automne et le printemps. (Figure 44).

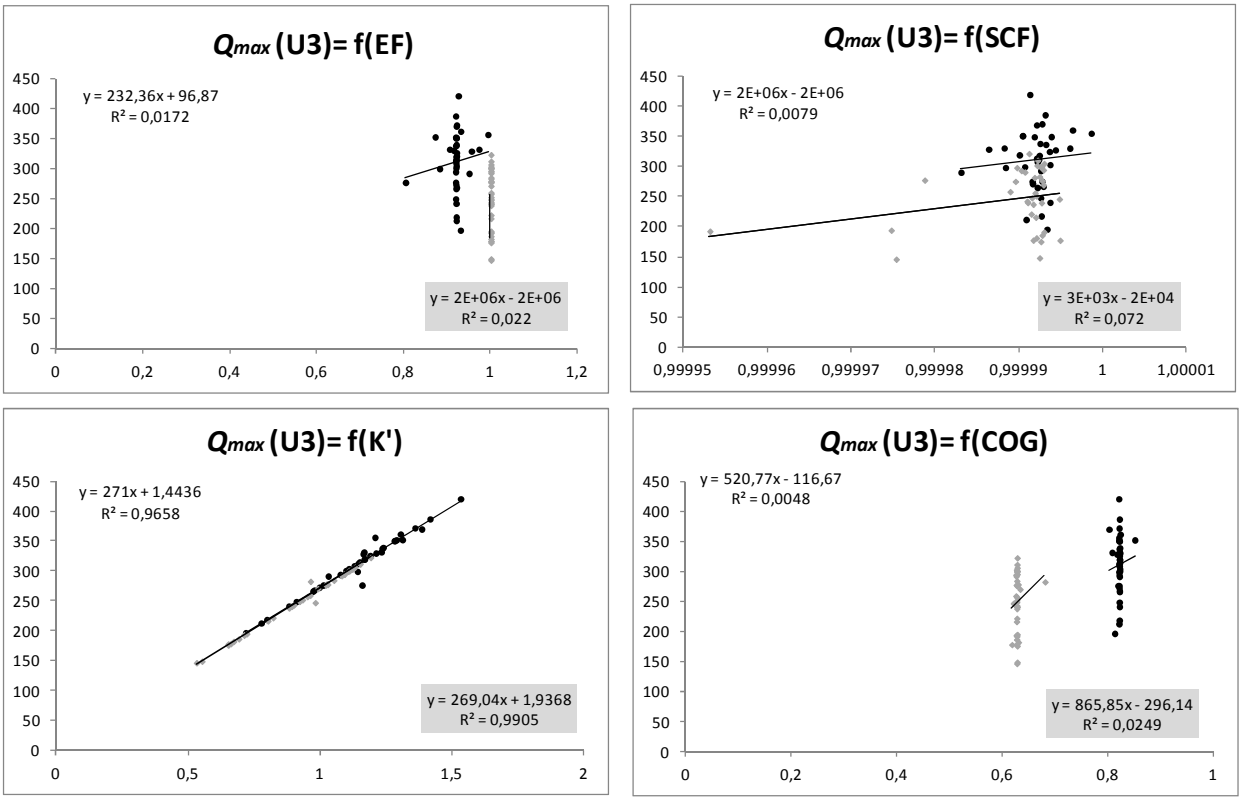


Figure 44 : Comparaison entre la capacité maximale du transport (*Qmax*) et les paramètres entrants dans *RWEQ* au niveau des parcelles cultivées, en automne (noir) et au printemps (gris).

7.2.5. Comparaison entre la capacité maximale du transport (Qmax) et les paramètres de la RWEQ (K', EF, SCF, COG), en automne et au printemps au niveau des (U4) (U4)

Les Comparaison s entre le *Qmax* pour les (U4) et les paramètres de la *RWEQ* sont sensiblement une droite au cours des deux saisons de mesures. L'ensemble des points pour les paramètres (*COG*, *EF* et *SCF*) sont très faiblement corrélé avec *Qmax* pour les deux saisons (R^2 varie entre 0,0002et 0,02). Alors que pour *K'* les points présentent relativement une bonne corrélation avec *Qmax* (R^2 0,98 et R^2 =0,99) respectivement pour l'automne et le printemps. (Figure 45).

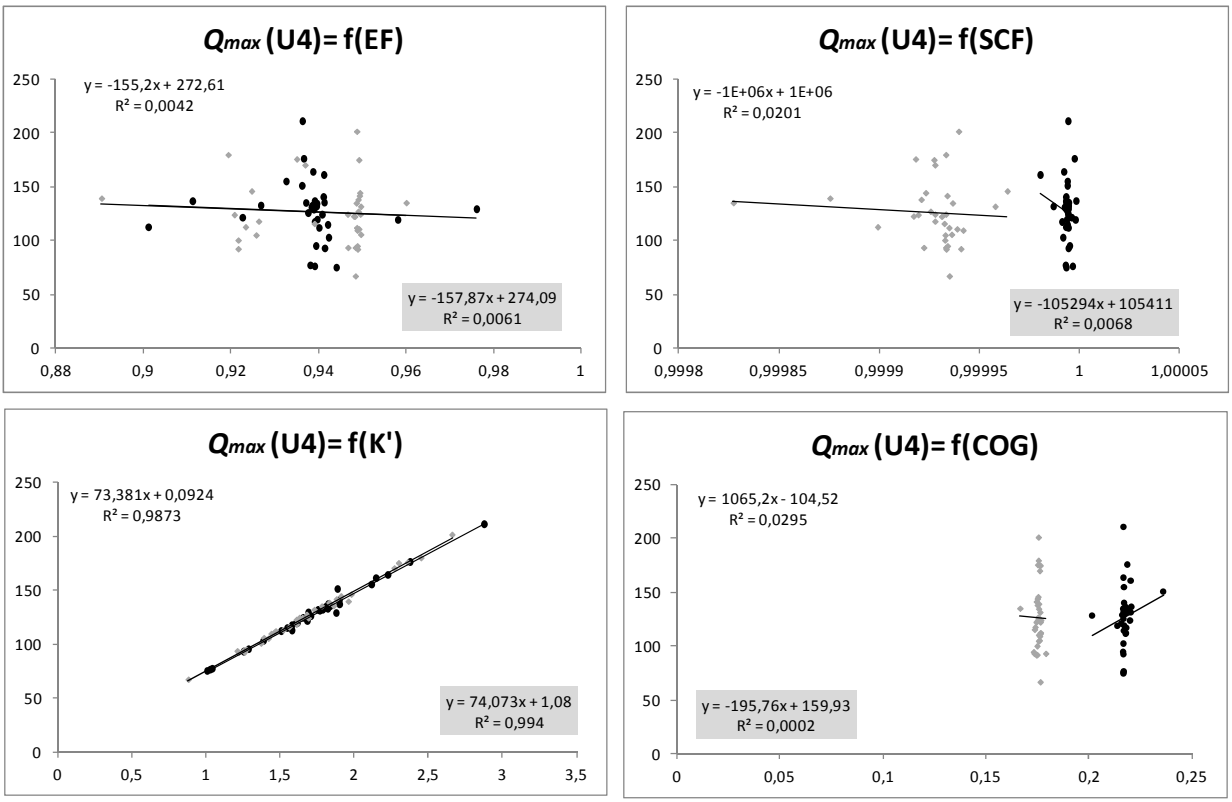


Figure 45 : Comparaison entre la capacité maximale du transport (*Qmax*) et les paramètres entrants dans *RWEQ* au niveau des petits plateaux caillouteux, en automne (noir) et au printemps (gris).

7.2.6. Comparaison entre la capacité maximale du transport (Qmax) et les paramètres de la RWEQ (K', EF, SCF, COG), en automne et au printemps au niveau des petits espaces encroutés (U5)

Les Comparaison s entre le *Qmax* pour les petits espaces encroutés les paramètres entrés de la *RWEQ* sont sensiblement une droite au cours des deux saisons de mesures. Les paramètres (*COG*, *EF* et *SCF*) sont très faiblement corrélés pour les deux saisons (R^2 varie entre 0,008 et 0,03). Cependant pour *K'* les points présentent relativement une bonne corrélation (R^2 0,98 et R^2 =0,99) respectivement pour l'automne et le printemps. (Figure 46).

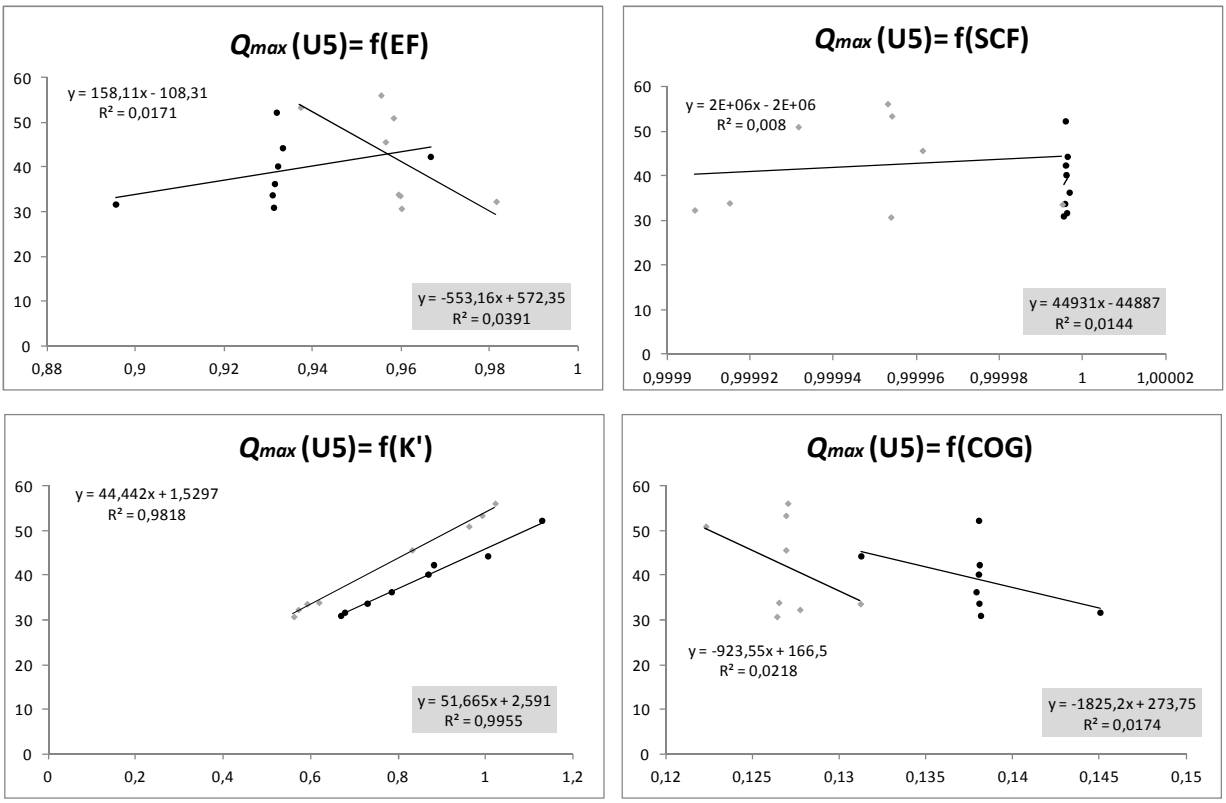


Figure 46 : Comparaison entre la capacité maximale du transport (*Qmax*) et les paramètres entrants dans *RWEQ* au niveau des petits espaces encroûtés, en automne (noir) et au printemps (gris).

7.3. Comparaison entre *EF* ET FE

7.3.1. Comparaison entre EF et FE en automne et au printemps, pour l'ensemble des points de mesure.

La Comparaison entre *EF* et FE pour la totalité des points est sensiblement une droite (figure 47). Nous remarquons aussi que l'ensemble des points sont faiblement en automne et au printemps corrélé (R^2= 0.20).

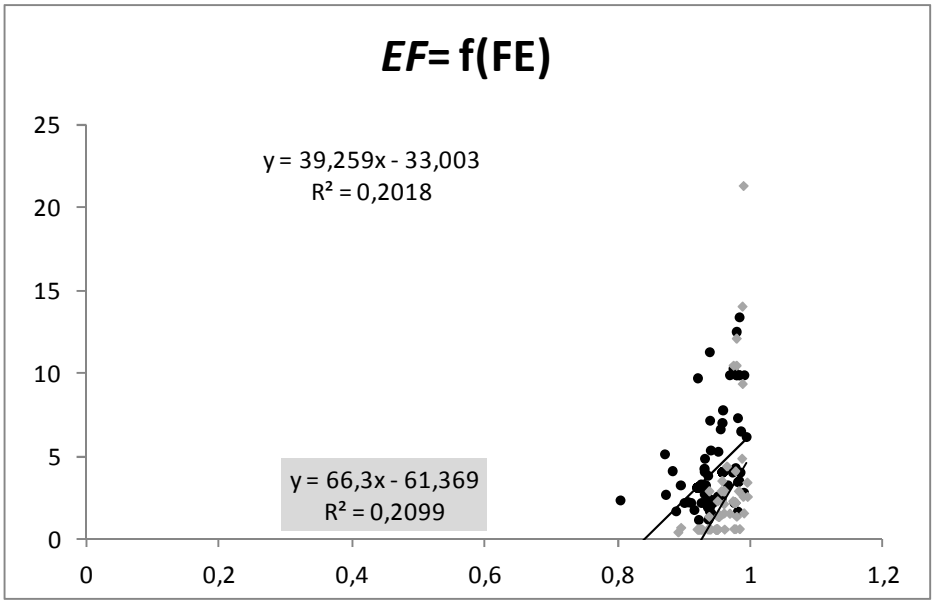


Figure 47 : Comparaison entre *EF* et FE pour l'ensemble la totalité des points en automne et au printemps, en automne (noir) et au printemps (gris).

7.3.2. Comparaison entre EF et FE en automne et au printemps, pour chaque unité géomorphologique

Les Comparaison s entre *EF* et FE pour chaque unité géomorphologique sont sensiblement une droite au cours des deux saisons de mesures. *EF* et FE sont très faiblement corrélés pour les deux saisons (R^2 varie entre varie entre une valeur infiniment faible <<1 et 0,19). Cependant au niveau des (U3) (U3) les points présentent relativement une corrélation moyenne (R^2 =0,49) pour le printemps. (Figure 48).

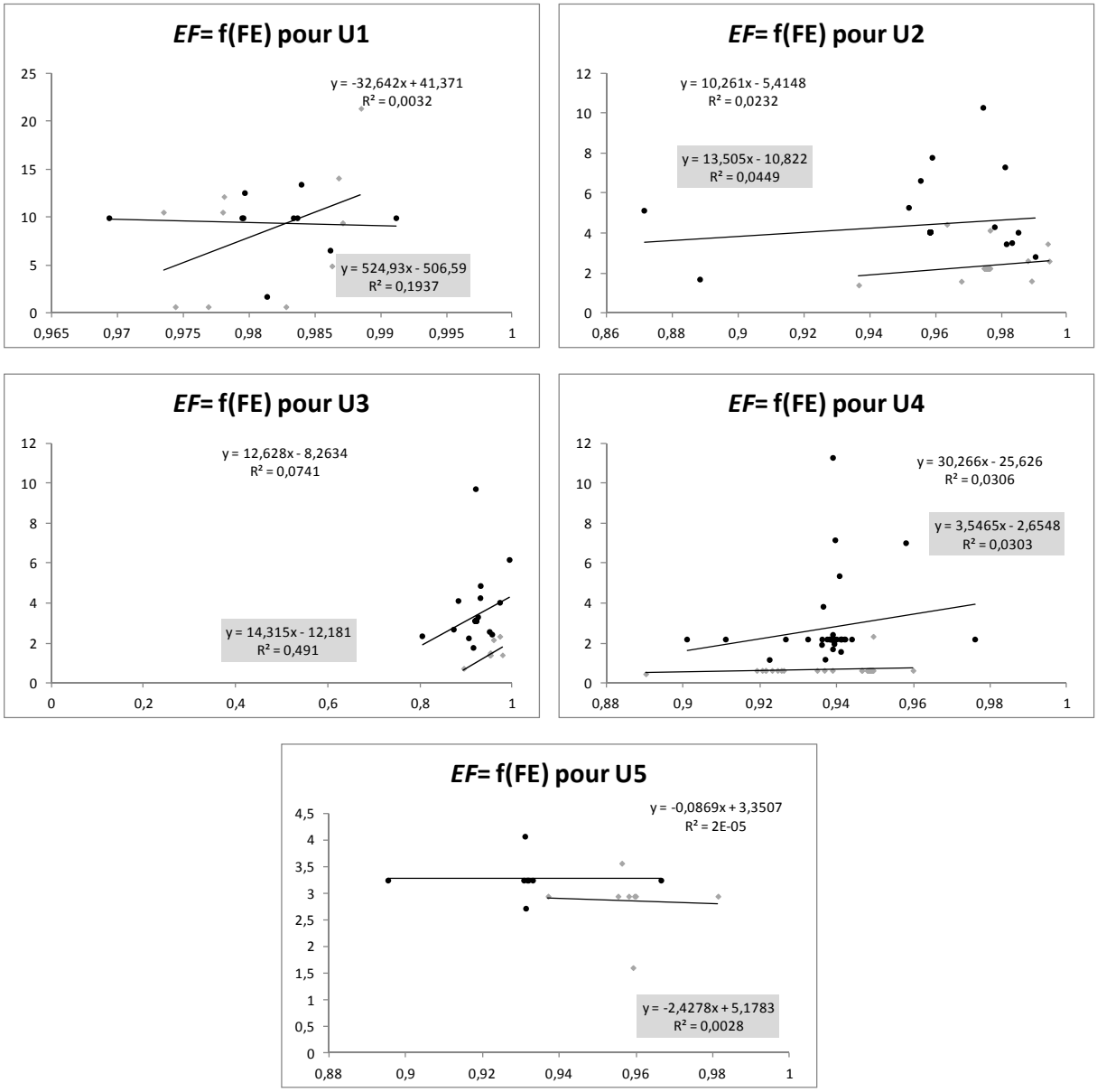


Figure 48 : Comparaison entre *EF* et FE pour chaque unité géomorphologique en automne et au printemps, en automne (noir) et au printemps (gris).

1. Le paysage dans la zone d'étude

L'approche géomorphologique est la méthode utilisée pour la typologie du paysage dans Mokrane. Visuellement cinq unités géomorphologiques ont été identifiées, Cependant cette représentation reste objective.

2. Climatologie de la zone d'étude

Les précipitations et les températures enregistrées durant la période de déroulement de notre travail montrent une nette sécheresse. Nos résultats sont en accord avec ceux qui ont précédemment décrit la région (Khelifi, 2008 ; Rahmoun, 2009; Serdoun, 2009; Azizi, 2010; Graa, 2010; Boumeddienne, 2010; Rochez, 2010; Djoubar, 2011; Benhassine, 2012). La zone d'étude est localisée dans la région de Laghouat, la valeur du Quotient pluviothermique d'Emberger de la région de Laghouat est de 13,98 avec une variante thermique de 2,11°C, ce qui classe Laghouat dans l'étage climatique saharien à hiver frais (Boumeddienne, 2010).

Les précipitations sont infiniment faibles lors des deux périodes durant lesquelles les mesures de terrain ont été effectuées, néanmoins la période séparant les deux périodes de travaux sur terrain a connu des précipitations relativement importantes. L'année peut être considérée comme années sèche.

L'humidité relative de l'air est en relation étroite avec les précipitations, des valeurs faibles sont observées pour les périodes de sorties sur terrain, et des valeurs maximales entre ces dernières.

Durant la période de nos mesures le vent dans la zone d'étude oscille dans toutes les directions, mais les directions dominantes sont dans le secteur Nord-ouest et Sud-ouest, l'étude menée dans la zone de Mokrane par (Houyou *et al.,* 2014) confirme aussi nos résultats.

Vraisemblablement la zone d'étude présentait des différences d'altitude lors de nos déplacements sur les transects tracés, mais le test ANOVA a permis d'observer une

différence non significative de l'élévation pour les unités géomorphologiques. Ceci révèle aussi une nature plate de la zone d'étude ce qui augmente son risque à l'érosion éolienne.

3. Les paramètres du sol et sa couverture dans la zone d'étude

3.1. Le Sol

3.1.1. La texture du sol de Mokrane

Les résultats obtenus par l'analyse granulométrique concordent avec la littérature, beaucoup d'auteur ont décrit la nature du sol des régions steppiques de l'Algérie. (Lelubre, 1952 ; Aubert, 1976 ; Gardi, 1973 ; Halitim, 1988 ; Taïbi, 1998).

L'analyse du sol n'a concerné que les deux premiers centimètres de la surface qui est concernée par l'érosion éolienne. La partie superficielle du sol de Mokrane est dans sa majorité sableuse, avec de faible teneur en argile et en limon. Les sables dominent à plus de 84 %. Les résultats montrent que la fraction limoneuse et argileuse augmente au détriment de la fraction sableuse au printemps, ceci est peut être due à la mobilité des particules de la couche superficielle du sol par les différents modes de transport. Il est à noter que lors des relevés effectués au printemps nous avons observé des changements au niveau des états de surface des couches superficielles des sols notamment pour les petites dépressions, les (U3) et les petits plateaux caillouteux, suite à un ensablement partiel de la surface des ces derniers.

3.1.2. Les carbonates de calcium

Les résultats de mesures de $CaCo_3$ s'accordent avec les résultats des différents travaux qui ont été fait dans la région. Nombreux auteurs confirment que les sols steppiques sont caractérisés par la présence d'accumulation calcaire (Halitim, 1988).

D'après Khadraoui (2004), la région de Laghouat se distingue principalement par trois grands ensembles, l'un se caractérise par les piémonts de l'Atlas saharien, le second par la plaine alluviale de l'Oued M'Zi et l'autre par un plateau à surface plane avec une charge caillouteuse en surface, ces sols sont généralement peu profonds. Les roches mères de ces

sols sont le plus souvent constituées par des formations marneuses et calcaires ce qui explique la richesse de ses sols de Mokrane en calcaires.

Les sols da la wilaya sont en majeur partie d'apport alluvial typique sur croûte calcaire, peu évolués, à texture légère à teneur faible en matière organique présentant ainsi des contraintes pour l'agriculture (C.D.F, 2008).

3.1.3. Les matières organiques

Les résultats ont montré des pourcentages de matière organique relativement élevés, ceci est due en grande partie à la méthode d'échantillonnage du sol, nous prélevons avec les sédiments des détritus de végétation et d'animaux et leurs excréments. Le model ne s'intéresse qu'à la couche superficielle du sol, toutes les études traitant l'érosion éolienne ne considère que la couche superficielle du sol, plus précisément au niveau des deux premiers centimètres de la surface du sol.

Les valeurs les plus importantes ont été observées au printemps, ceci est due en grande partie aux activités humaine, la surface du sol est la partie la plus exposée aux modifications qu'apporte les activités humaines, notamment le pâturage. Il est à signaler qu'au printemps nous avons remarqué des traces de piétinements, d'ovins et de bovins, autour et sur pratiquement tous les points de mesure, ceci d'une part mais également aux chutes probables de parties de la végétation (feuilles, tiges…) qui s'est développée après les pluies qui ont précédé notre deuxième période de sortie sur le terrain.

3.2. La couverture du sol

3.2.1. Végétation dans la zone de Mokrane

L'application de l'indice écologique (richesse totale) a permis d'avoir un aperçu sur l'état de la végétation la zone d'étude durant deux périodes de l'année. La richesse totale en espèces est de l'ordre de 11 en automne, elle de 27 espèces au printemps, et selon l'échelle de classification proposée par Daget et Poissonet (1991) la zone présente une richesse totale pauvre en automne et est moyenne au printemps. En automne la richesse totale révèle que la richesse est raréfiée au niveau des (U1) et les petits plateaux caillouteux, et

elle est pauvre au niveau des (U2) et les petits espaces encroûtés. Néanmoins cette richesse a augmenté au printemps, mais garde toujours son classement moyen pour les dunes peu végétalisées, et passe de très pauvre à pauvre pour le reste des unités géomorphologiques. Ceci est expliqué par la présence des plantes éphémères au printemps, tributaires des conditions climatiques favorables à leur développement qui avaient lieu entre les périodes durant lesquelles nous avons fait nos mesures sur le terrain, et qui disparaissent très rapidement après leurs apparitions en fonction des conditions climatiques aussi (Aidoud, 1989). La faible richesse végétale observée est peut être due aux choix des dates de sorties sur le terrain.

L'influence des facteurs climatiques sur la répartition et le rendement de la végétation n'est plus à démontrer. Plusieurs auteurs ont traité le climat de l'Algérie, la plupart des travaux concernent surtout les précipitations (Seltzer, 1946 ; Dubief, 1959 ; Gaussen, 1948 ; Chaumont et Paquin, 1971 ; Le Houérou, 1988 ; Djellouli, 1990 ; Daget et Djellouli, 1991 ; Aidoud-Lounis, 1997 ; Hirche *et al.*, 2007 et Hirche, 2010).

La répartition des espèces et des familles est très variable suivant les unités géomorphologiques. En effet, les facteurs édaphiques interviennent sur le développement de la végétation (Chehma *et al.,* 2005). Dans notre zone d'étude, nous avons constaté la dominance de trois familles : les Asteraceae, les Brassicaceae et Fabaceae.

Les espèces qui dominent dans la zone d'étude appartiennent aux genres (*Aristida et Astragalus*) sont des espèces psammophytes rencontrées en zones sableuses (Le Houérou, 1995, Chehma *et al.*, 2005 ; Bensaid, 2006).

L'installation *d'Aristida pungens* est probablement observée suite à la destruction de l'alfa et à de fortes accumulations de sable, ou bien à un milieu soumis à une pression anthropique, notamment pâturage et labours, ce qui a permis le développement des espèces psammophytes, sélectives de voile sableux (Hammouda, 2009). Les steppes à drine (*Aristida pungens*) sont localisées sur les dunes, les sols sableux sont essentiellement caractérisés par la dominance d'*Aristida pungens* (Djebaili, 1984), elle représente à elle seule plus de 80 % des taux de fréquence et de recouvrement, constituant, ainsi de très vastes steppes homogènes (Chehma *et al.,* 2005).

La couverture du sol est la combinaison de sa couverture par la végétation photo-synthétiquement active, de la couverture du sol par les résidus plats, la charge caillouteuses et de la silhouette des végétaux su pieds.

La couverture du sol par les végétaux verts, a présenté de très faibles valeurs, surtout en automne au niveau des (U1) et des parcelles cultivées, ceci s'explique par le faible taux de croissance de l'orge, cultivé en pluvial, souffrant des conditions climatiques sévères qui constitueront un facteur limitant pour son développement. Pour les (U1) ce sont les conditions édapho-climatique qui limitent le développement de végétation. Le défrichement, le pâturage et les conditions climatiques sont à l'origine de ce faible couvert végétal au niveau des parcelles cultivées.

D'après Halitim (1988) et Nedjraoui (2003), les steppes sont de vastes étendues couvertes d'une végétation basses très ouverte, caractérisées par un faible couvert végétal.

Le surpâturage conduit à diminuer la couverture végétale et la biomasse (Enne *et al.,* 2004 ; Yong-Zhong *et al.,* 2005 ; Xie *et al.,* 2007). Mokrane est une zone de transhumance (nos observations), le pâturage dans le lieu explique aussi les faibles valeurs de la couverture végétale.

4. Les facteurs intervenant dans le modèle RWEQ

4.1. Le facteur climatique

Pour les 5 facteurs calculés, seuls le facteur climatique (*WF*) et le facteur de la rugosité, pouvant valoir plus que l'unité. En effet le facteur climatique est très prépondérant dans l'estimation du Q_{max}. Les résultats ont montré que sa valeur est relativement faible en automne (3,28) par apport à celle mesurée au printemps (4,14). Il fait intervenir pour son estimation 3 facteurs, à savoir le facteur du vent, le facteur de l'humidité et le facteur d'enneigement, dans notre cas le deuxième et le troisième facteur prennent une valeur qui vaut à 1, seul le facteur du vent est pris en considération pour le calcul du facteur climatique ce qui explique sa variation inter-saisonnière. Des vitesses de vents plus fortes excédants la vitesse seuil de saltation ont été enregistrées au printemps par apport à celle enregistrées en automne par notre station météorologique. La méthode d'estimation de ce

facteur se base sur les relevés de la station météorologique installée au champ. L'équation *RWEQ* est en théorie basée sur des valeurs annuelles. Cependant, une méthodologie d'exploitation des données pour un évènement unique a été validée et testée par Fryrear *et al*. (1998 a).

4.2. Le facteur érodible (EF) et la fraction érodible (FE)

En réalité le facteur érodible ou la fraction érodible est un facteur qui prend des valeurs allant de 0 à 1, le facteur érodible (*EF*) estimé en utilisant la formule développée par (Fryrear *et al.,* 1994) reliant le facteur *EF* aux propriétés physiques et chimiques du sol, donne des valeurs dépassants pour la quasi-totalité des points de mesure la valeur maximale du facteur et pouvant atteindre une valeur égale à 21 ce qui correspond à 2100 %. Ceci est peut être expliqué par les intervalles de validité de cette équation empirique (% des sables, % des limons, % des argiles, % de la matière organique et le % des carbonates de calcium) fixées par Fryrear et *al* en 1994 lors du paramétrage de cette équation dans des conditions différente que celles des steppes.

Visser et al. 2005, sont arrivés à la conclusion que le *RWEQ* appliquée dans un contexte Sahélien n'atteint pas des niveaux de précision satisfaisants car les équations établies pour *EF* et *SCF* ne sont pas représentatives de la situation sahélienne et que les erreurs proviennent majoritairement de *EF* et *SCF*.

Les valeurs de la fraction erodible (*FE*) utilisée (pour l'estimation du *Qmax* est plus importante an printemps par apport à celles mesurées en automne. Ceci peut être expliqué par la mobilité des particules de la couche superficielle du sol sous l'action du vent. Les valeurs de la fraction érodible sont variables d'une unité géomorphologique à une autre, le test ANOVA effectué pour ce paramètre a montré que le type d'unité géomorphologique présente un effet significatif sur la fraction érodible. Les plus importantes valeurs sont observées au nivaux des (U1) tandis que les plus faibles valeurs sont observées au niveau des petits plateaux caillouteux.

4.3. Le facteur d'encroutement (SCF)

Le facteur d'encroûtement (Soil Crust Factor : *SCF*) prend des valeurs très proches de l'unité pour l'ensemble des points et pour les deux périodes dans lesquelles les mesures ont été faites. Etant donné que quasiment aucune croûte n'a été observée à l'exception de points de mesures se situant au niveau des petits espaces encroutés et quelques points de mesures au niveau des petits plateaux caillouteux, son importance relative est donc faible. Par contre, ce facteur peut être prépondérant dans certains cas où la teneur en argile est plus importante (Buschiazzo et Zobeck, 2008).

Un moyen de remédier à ceci serait d'intégrer le type de croûte (disponibilité de sédiments) et l'abrasion de cette dernière par des particules transportées par la saltation dans les prédictions d'*EF* et de *SCF*. La topographie, l'intensité des précipitations et la quantité depuis le dernier labour pourraient permettre la prédiction du type de croûte et de sa résistance.

4.4. Le facteur de la couverture de sol (COG)

Le calcul du facteur de la couverture du sol est fonction des trois coefficients de perte en sol (SLR_c, SL_{Rf} *et* SLR_s). Le facteur de la couverture du sol prend des valeurs allant de 0 à 1, lorsque le sol est nu, (absence de charge caillouteuse, de débris et de végétation), ce facteur prend une valeur maximale et qui vaut à 1. En automne les valeurs du facteur de la couverture du sol est plus importantes que celles observées au printemps et pour toutes les unités géomorphologiques. Ceci est expliqué par le développement de la végétation au printemps d'une part, d'autre part l'apparition des plantes éphémère tributaire des conditions climatiques temporaires. Ceux la ont contribué à la baisse des valeurs du facteur de la couverture de sol. Les valeurs les plus importantes du facteur, de la couverture du sol ont été observées au niveau des (U1) à cause justement de leurs faible éléments en matière de couverture de sol notamment la charge caillouteuses les débris végétaux et la présence d'un très faible couvert végétal. Des valeurs proches de celles trouvées au niveau des (U1) ont été également notées au niveau des (U3) exposant ainsi le sol à l'action des vents, le défrichage et les labours sont à l'origine d'une couverture de sol quasi-absente et par conséquent une valeur du facteur de la couverture de très importante alors que les valeurs

les moins importantes se situent au niveau des petits espaces encroûtés, des (U4) et des (U2) respectivement. Ceci peut s'expliquer par la présence d'une charge prépondérante, de débris plats et d'une végétation prospère.

4.5. La rugosité (K')

La rugosité estimée à partir du rugosimètre à aiguilles pour l'ensemble des unités géomorphologiques montre qu'elle est faible et ne dépasse pas 3 cm, pour les deux saisons. Nos résultats sont en accord avec ceux mesurés par (Fryrear, *et al., 1998b*) aux états unis, (Tidjani, 2008) dans un contexte sahélien. Les valeurs de rugosité les plus importantes sont observées au niveau des (U4) et des petites dépressions, à cause de la charge caillouteuse conséquente présente au niveau des ces deux dernières unités géomorphologique. Tandis que les valeurs les plus basses ont été observées au niveau des (U1) et des parcelles cultivées, les steppes à psamophytes présentent des valeurs intermédiaires

5. La capacité de transport maximale de sédiments (Qmax)

Les résultats ont montré que la capacité de transport maximale des flux de sédiment est plus importante en automne qu'au printemps. Malgré que le facteur climatique en automne est moins important que celui du printemps, et qui est un paramètre multiplicatif dans le modèle. Ceci est peut être expliqué par l'effet de la végétation. Un développement de la végétation au printemps explique cette différence, notamment en hauteur qui a significativement augmenté, les valeurs de la silhouette végétale qui fait intervenir dans son calcul la hauteur et le nombre et le diamètre des plants. Ce paramètre est très élevé au niveau des (U3) au printemps par rapport a celui estimé en automne, et de ce fait les (U3) en automne montrent une grande capacité de transport maximale de sédiments à cause notamment du défrichement et des opérations du travail du sol, alors qu'après que l'orge a poussé, cette capacité doit significativement diminué. Nombreuses études ont porté sur l'effet de la végétation et la couverture du sol d'une manière générale que ça soit par la végétation vert, les résidus végétaux et la silhouettes, sur le rôle prépondérant que joue cette dernière sur la diminution de l'érosion éolienne (Siddoway et Woodruff,1965 ; Skidmore *et al.,* 1966 ; Fryrear et Armbrust, 1968 ; Bilbro et Fryrear, 1994 ; Sterk, 1997 ; Bielders *et al.,* 2000 ; Bielders *et al* 2002 et Bielders *et al.,* 2004 ;

Rajot *et al.*, 2009 ; Touré *et al* , 2011). D'autre par, la rugosité a diminué au printemps ce qui a induit une augmentation de la capacité de transport maximale des flux de sédiment. En revanches les résultats du *Qmax* ont montré une diminution de ce dernier au printemps nous avons remarqué sur le terrain, que l'état de surface avait tendance à s'aplanir par l'action du vent et les tempêtes de sable qu'a connu le site d'étude en Janvier 2014 entre les deux période de prise de mesure, ceci et très frappant aux niveaux des (U3) rendant ainsi la surface labourée plane et sur les petites dépressions, envahies par les sables. Dans notre cas les écarts observés sont probablement du à l'anthropisation de la zone, en effet une mauvaise gestion des écosystèmes steppiques entraîne une désertification, une réduction de la diversité et une augmentation de l'érosion (Le Houerou, 1995 ; Maselli, 1995 ; Bourbouze, 2000).

La capacité de transport maximale des flux de sédiment est variable d'une unité géomorphologique à l'autre. En automne, la sensibilité à l'érosion éolienne au niveau des (U1) est la plus importante, ceci est déduit par les valeurs élevées de la capacité de transport maximale des flux de sédiment, une très faible couverture du sol, une végétation quasiment inexistante, une importante fraction érodible et des teneurs faibles en argile et carbonates de calcium sont à l'origine d'une grande sensibilité à l'érosion éolienne. Des valeurs voisines de celles trouvées au nivaux des (U1) ont été trouvées au niveau des parcelles cultivées, ceci dit que les (U3) ont le même degré de la sensibilité à l'érosion, voir même plus important. Nos résultats ont montré que les petites dépressions et les (U4) sont les unités géomorphologiques les moins sensibles à l'érosion éolienne, les valeurs les plus élevées en matière de couverture du sol (de charge caillouteuse et une couverture végétale) sont plus présentes relativement au reste des unités géomorphologiques. Les steppes à psamophytes ont quant à elles des valeurs intermédiaires entre les unités géomorphologiques qui ont une forte sensibilité à l'érosion éolienne et les unités géomorphologiques présentant une faible sensibilité à l'érosion éolienne.

6. Analyses de sensibilité des résultats

Pour rappel, afin de voir le comportement de la zone de Mokrane vis-à-vis de l'érosion éolienne et les facteurs les plus déterminants de la capacité maximale du transport, nous avons procédé à des analyses de sensibilité des résultats obtenus. Pour ce faire, des

relations par régression linéaire entre le sortant Q_{max} de la *RWEQ* et les intrants intervenant dans son calcul (*FE*, *SCF*, K ‘, *WF* et *COG*) en automne et au printemps ont été effectué pour l’ensemble des points de mesure et pour chaque unité géomorphologique.

La relation entre la capacité maximale du transport de sédiment au printemps et en automne pour la totalité des points était sensiblement une droite. L’ensemble des points sont très faiblement corrélé, ceci confirme que la zone de Mokrane ne se comporte pas de la même manière vis-à-vis de l’érosion éolienne, la réponse est plus aigue au printemps qu’en automne.

Pour chaque unité géomorphologique, la relation entre la capacité maximale du transport de sédiment en automne et au printemps montre que l’ensemble des points sont également très faiblement corrélé.

Les résultats des relations établies entre la capacité maximale de transport de sédiment et les paramètres intervenant directement dans le calcul de cette dernière n’ont pas donné de bons coefficients de corrélation. Seul les relations établies entre la capacité maximale de transport de sédiment et le facteur de rugosité K’ ont donné de bons coefficients de détermination. Néanmoins, le facteur de rugosité n’est pas le seul qui influe la capacité maximale de transport de sédiment et par conséquent les autres facteurs intervenant aussi dans son calcul, les faibles corrélations obtenues entre le *Qmax* et le *FE, SCF* et *COG* sont dues en grande partie aux valeurs que prennent ces derniers, une faible sensibilité des valeurs de *FE* et *SCF* sont probablement à l’origine de cette faible corrélation. Quant à la relation entre la capacité maximale du transport et le facteur de couverture du dol *COG*, ce dernier fait intervenir la couverture végétale, la silhouette végétale et les résidus végétaux pour son calcul. (Les tableaux 3 et 4) indiquent que la végétation présente diffère d’une unité géomorphologique à l’autre, les végétaux présents ont des dimensions (hauteurs, diamètres…) variables d’une espèce à l’autre et peuvent être à l’origine dans la différence de couvertures estimées au niveau des unités géomorphologiques.

Les résultats des relations établies entre le facteur érodible et la fraction érodible pour l’ensemble des points ont donné de faibles coefficients de détermination, et de très faibles coefficients de déterminations pour chaque unité géomorphologique, et qui normalement

donneront de bons coefficients de déterminations ceci vient confirmer que l'équation utilisée pour l'estimation de EF n'est pas valide dans un contexte steppique et qu'une calibration de cette dernière s'avère nécessaire pour l'utilisation du model RWEQ.

7. Fiabilité sur l'estimation des paramètres de RWEQ

Lors de la validation du modèle *RWEQ*, Fryrear et *al*. (1998b) ont montré que la corrélation entre les pertes en terre observées et simulées était de 0,97 pour 11 évènements. Zobeck *et al*. (2001) ont mis en évidence que le modèle *RWEQ* sous-estimait l'érosion éolienne pour 41 tempêtes localisées aux Etats-Unis. Van pelt et *al*. (2004) sont également arrivés à la même conclusion. Le modèle semble donc très bien adapté pour certains endroits et conditions climatiques mais ne peut pas être une généralisation. Une étude menée dans la pampa d'Argentine par Buschiazzo et Zobeck (2008) montre une sous estimation de modèle *RWEQ* de l'ordre de 45 % par rapport aux données observées. Cette sous estimation de l'ordre de 35 à 55 % est confirmée par d'autres travaux (Zobeck *et al.*, 2001 ; Van pelt *et al.*, 2004).

Cette forte différence peut en partie s'expliquer par le facteur climatique qui, pour rappel, influence fortement les valeurs prédites. L'estimation de celui-ci n'est peut-être pas validée pour le climat et la région Nord du Sahara. Selon Buschiazzo et Zobeck (2008), l'origine de la différence entre valeurs observées et modélisées n'est pas claire. Ces auteurs pensent en effet que la différence proviendrait de l'utilisation d'équations différentes et des méthodes utilisées dans le calcul du flux de masse horizontal mesuré à l'échelle du terrain. Ils mentionnent également que la hauteur des capteurs de sable peut être en partie responsable de cette variation (Buschiazzo et Zobeck, 2005). Davantage d'estimations au cours du temps permettront peut-être d'ajuster au mieux ce modèle pour la région de Laghouat.

Peu d'études ont fait l'objet de l'utilisation et de la critique du model *RWEQ* au Sahel ou les conditions naturelles sont proche a celles de notre région. L'étude réalisée par Visser et *al*. (2005) porte sur l'applicabilité du modèle *RWEQ* dans un contexte sahélien. Trois sites présentant des propriétés géomorphologiques distinctes sont considérés : un site dégradé, un fond de vallée et un site composé de dunes de sable. Les données requises par le modèle

sont récoltées, et des capteurs de sable sont installés sur une parcelle de 80 m x 80 m sélectionnée pour chacun des sites. Le facteur d'enneigement (SD) ainsi que 1a rugosité orientée (Kr) sont négligées. Les valeurs mesurées et les valeurs prédites de *Qmax* sont comparées afin de vérifier si les modèle *RWEQ* est valide dans un contexte sahélien. Une bonne corrélation entre ces valeurs permet l'estimation de la masse de transport (Q). Cette valeur est ensuite comparée à la masse de transport mesurée à l'aide des capteurs de sable.

Les facteurs intervenants dans le *RWEQ* prennent dans le Sahel des valeurs similaires à celles établies à l'origine dans le contexte des Etats-Unis. De plus, le modèle est adapté à une grande variété de climats se retrouvant aux Etats-Unis. On peut donc supposer que des événements convectifs éoliens comparables aux tempêtes convectives du Sahel aient lieu aux Etats-Unis (Dogget *et al.,* 2003). On peut donc s'attendre à ce que l'équation 5 soit valide pour la région sahélienne.

Néanmoins, ce modèle suppose l'existence d'une certaine homogénéité de la rugosité, de la couverture végétale et des caractéristiques du sol. Dans le Sahel, la situation est généralement tout autre donc la structure du modèle *RWEQ* devra être modifiée. Par ailleurs, le calcul des paramètres du modèle demande des connaissances précises (base de données rassemblant les conditions climatiques pour un lieu bien défini) à une échelle très fine. Ces données sont rarement disponibles et devront donc être récoltées par l'expérimentateur. Finalement, les pertes de sol sont considérées comme étant variables sur l'ensemble du champ avec une capacité de transport des particules du sol par le vent maximale à une distance relativement courte de la bordure d'un champ et des pertes de sol négligeables au-delà de cette distance. On constatera un écart important avec les conditions pour lesquelles le modèle a été paramétré en raison de l'absence de bandes non érodables autour de nos points de mesure. L'utilisation de l'Équation 6-1 pourrait résoudre ce problème, cependant il existe des incertitudes concernant la fiabilité de cette Équation car elle n'a pas encore été suffisamment testée.

La quantité maximale de transport de masse *Qmax* prédite est fortement sous-estimée pour l'ensemble des sites.

Les auteurs sont arrivés à la conclusion que le *RWEQ* applique dans un tel contexte n'atteint pas des niveaux de précision satisfaisants car les équations établies pour *EF* et *SCF* ne sont pas représentatives de la situation sahélienne. Un moyen de remédier à ceci serait d'intégrer le type de croûte (disponibilité de sédiments) et l'abrasion de cette dernière par des particules transportées par saltation dans les prédictions d'*EF* et de *SCF*. La topographie, l'intensité des précipitations et la quantité depuis le dernier labour pourraient permettre la prédiction du type de croûte et de sa résistance.

Dans notre cas, des comparaisons entre les flux estimés et les flux calculés n'ont pas été faites. Ceci implique de mobiliser de gros moyens, notamment l'installation de capteurs de sable au niveau chaque points de mesure (Unités géomorphologiques). Néanmoins pour les (U3) dans la région de Mokrane (Djekidel, 2014) a mesuré sur une parcelle cultivée à l'orge en pluvial des flux bien supérieurs à ceux que nous avons estimé dans les processus éoliens. Nous avons pu déduire que le modèle sous estimes la quantité maximale de transport de masse, ceci reste arbitraire et nécessite une confirmation au niveau des autres unités géomorphologiques.

A travers notre étude, nous avons pu distinguer une variabilité géomorphologiques de la zone de Mokrane, cinq unités géomorphologiques ont été décrites, sur lesquelles une estimation de la capacité maximale du transport de sédiments Q_{max} a été effectuée. Les unités géomorphologiques décrites ne présentent aucune particularité de distribution spatiale, partout dans la zones d'étude en nous déplaçons sur l'ensemble des transects préalablement tracés les géo-formes ont été observées.

Les deux saisons durant lesquelles nous avons effectué notre travail de terrain peuvent être qualifiées de sèches vues la faiblesse des précipitations enregistrées. Les mois d'hiver 2014 étaient relativement ventés.

Un taux de couverture végétale compris en 0,083 % et 20.92% reflète une faiblesse de la densité de la végétation présente dans les lieux pouvant être relativisée à des conditions climatiques agressives dans la zone.

Les analyses granulométriques effectuées pour l'horizon superficiel ont montré sa nette légèreté vue la dominance des sables à plus de 90 % dans sa composition. Une importante fraction erodible dépassant les 84 % a été observée au niveau de toute la zone de Mokrane reflétant la prédisposition des particules aux transports éoliens.

Des taux remarquables de calcaires ont été mesurés dans le sol relevant de la localisation steppique de Mokrane. Les matières organiques mesurées au niveau de cet horizon superficiel reflètent la présence de détritus dont l'origine reste à déterminer.

Le modèle *RWEQ* nous a permis d'estimer la capacité maximale du transport de sédiments Q_{max}. A travers la répartition spatiale des points de mesures et vu les grandeurs estimées pour le transport éolien, nous pouvons dire que la zone de Mokrane ne se comporte pas de la même manière vis-à-vis de l'érosion éolienne. Chaque unité géomorphologique présente un comportement particulier à l'érosion éolienne estimée. Les valeurs les plus élevées Q_{max} ont été estimées au niveau des dunes peu végétalisées, des valeurs moins importantes mais très proche de celles estimées au niveau des dunes peu végétalisées sont également estimées au niveau des parcelles labourées, les valeurs les plus faibles de Q_{max} sont estimées au niveau des petites dépressions et les petits plateaux caillouteux, les valeurs enregistrées au niveau des steppes à psammophytes prennent des valeurs intermédiaires entre les quatre unités géomorphologiques. La distribution spatiale des unités géomorphologique permet de conclure

que la zone présente effectivement une sensibilité à l'érosion éolienne tributaire des unités géomorphologiques qui la composent.

La variabilité de ce comportement à l'érosion éolienne est également fonction de la variabilité saisonnière, des valeurs de Q_{max} sont plus importantes en automne qu'au printemps et ceci pour les cinq unités géomorphologiques rencontrées dépendantes à leur tour des conditions édaphiques.

Les analyses de sensibilité effectuées par régression linéaire de nos résultats montrent que les relations entre la capacité maximale du transport de sédiments Q_{max} et le facteur de rugosité ont donné les meilleurs coefficients de détermination, et par conséquent le rôle prépondérant de ce facteur dans les processus éoliens dans la zone de Mokrane.

L'effet de la couverture du sol, notamment par la végétation est l'un des paramètres les plus importants influençant le comportement de notre zone d'étude vis-à-vis l'érosion éolienne, un défrichage des sols au niveau du périmètre de Mokrane entraine la disparition de la végétation spontanée et rend ainsi le sol très sensible à l'érosion éolienne ceci est confirmé par les valeurs que prend le Q_{max} au niveau des parcelles labourées. La politique de la mise en valeur des sols dans les Wilayets du Sud porte à la réflexion.

A l'issue de cette étude, Les résultats obtenus semblent plutôt encourageants et appellent à une prolongation des mesures. Afin de favoriser de meilleurs résultats, mais il est nécessaire de prendre garde aux méthodes employées sur le terrain concernant la couverture végétale et la rugosité du sol, et obtenir enfin des résultats et des tendances plus tranchés.

La continuité de l'utilisation du modèle *RWEQ* permettrait peut-être de le calibrer et d'obtenir des résultats satisfaisants pour les différents facteurs mesurés. Des mesures des flux de sédiment par le biais des capteurs de sable doivent être aussi prises en compte pour pouvoir comparer les flux de masse estimés et les flux de masse mesurés, rendant ainsi la calibration des équations du sol, surtout celles qui permettent le calcul de *SCF* et *EF* et d'ajuster le modèles *RWEQ* aux conditions climatiques et édaphique de la région de Laghouat.

Abdourhamane Touré, A., Rajot, J.L., Garba, Z., Marticorena, B., Petit, C. et Sebag, D. 2011. *Impact of very low crop residues cover on wind erosion in the Sahel.* Catena 85 (3), 205-214.

Aidoud ,A. et Lounis, F., 1984. *Contribution à la connaissance des groupements à sparte (Lygeum spartum) des hauts plateaux sud-oranais. Etude phytoécologique et syntaxonomique*. Thèse doct. 3eme cycle, USTHB. Alger, 253p

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.)

Aidoud, A., 1989. *Les écosystèmes steppiques pâturés d'Algérie : fonctionnement, évaluation et dynamique des ressources végétales*. Thèse Doct., Univ. Sci. Technol. H. Boumediene, Alger,250p.

Aidoud-Lounis, F., 1997. *Le complexe à alfa-armoise-sparte (Stipa tenacissima L., Artemisia herba-alba Asso., Lygeum spartum L.) des steppes arides d'Algérie ; structure et dynamique des communautés végétales.* Thèse Doctorat ES Science, Univ. Aix-Marseille III, France, 214 p. + Ann.

Aubert, G., 1976. *Les sols sodiques en Afrique du Nord*. Annales INA, VI, N° 1, pp: 185-196.

Azizi, M., 2010. *Contribution à l'étude de l'évolution de l'état de surface d'un sol dans une mise en défens dans la région de Laghouat. Mémoire de Licence*. Université d'Amar Thelidji de Laghouat. 29p.

Bagnol, R.A., 1937. *The size-grading of sand by wind*. Proceedings of Royal Society of London A 163(913) :250-264.

Bagnold, R.A., 1941. *The physics of blown sand and desert dunes*. Chapman and Hall, London 256.

Bagnold, R.A., 1953. *Forme des dunes de sable et régime des vents. Actions éoliennes, phénomènes d'évaporation et d'hydrologie superficielle dans les régions arides*. Centre national de la Recherche scientifique (CNRS), Paris, Colloques internationaux 35: 23- 32

Bagnold, R.A., 1953. *The surface movement of blown sand in relation to meteorology*. Desert Research, Proceedings of the International Symposium,Jernsalem, 7-14 May 1952, Research Council of Israël, Spécial Publication 2: 89-93.

Bagnouls, S.F. et Gaussen, H., 1953 . *Saison sèche et indice xérothermique*. Bull. Hist. Nat. Toulouse, 88, pp 193 – 239pp.

Bales, C.L.K. et Neville, P.R.H., 2002. *Modelling soil erosion sensitivity using digital image processing*. Automation Congress, 2002. Proceedings of the 5 Biannual Word, 13:83-93

Benhassine, F., 2011. *Contribution à l'inventaire de la végétation dans un parcours dans la région de Laghouat (cas de la zone Kaf Mokrane)*. Mémoire de Licence. Université d'Amar Thelidji de Laghouat. 35p.

Bensaid, A., 2006. *Sig et télédétection pour l'étude de l'ensablement dans une zone aride: le cas de la wilaya de Naama (Algérie)*. Thèse de doctorat. Université Joseph Fourier-Grenoble, 229 p.

Bielders, C.L., Alvey, S., et Cronyn, N., 2001. *Wind erosion: the perspectives of grass-roots communities in the sahel*. Land Degradation & Development.12: 57-70.

Bielders, 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.

Bielders, C.L., Rajot, J.R., Amadou, M., 2002. *Tranport of soil and nutrients by wind in bush fallow land and traditionally managed cultivated fields in the Sahel*.Geoderma 109, 19–39.

Bielders, 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.

Bielders, C.L., Vrieling, A., Rajot, J.L., Skidmore, E., 2001. *On-farm evaluation of fieldscale soil losses by wind erosion under traditional management in the Sahel*. Soil erosion research for the 21st century, 3-5 janvier 2001. 494-497.

Bilbro, J.D. et Fryrear, D.W., 1994. *Wind érosion losses as related to plant silhouette and soil cover*. Agron. J.86(3): 550-553.

Bisal, F., et Nielsen, K.F. 1962. *Movement of soil particles in saltation*. Canad. Jour. Soil Sci. 42(l) : 81-86.

Lyles, L.et Krauss R.K., 1971. *Threshold velocities and initial particle motion as influenced by air turbulence*. TRANSACTIONS of the ASAE 14(3):563-566.

Blumberg, D.G., Greeley, R., 1993, *Field studies of aerodynamic roughness length*. Journal of Arid Environments 25[1], p 39-48

Bonn, F., 1998. *La spatialisation des modèles d'érosion des sols à l'aide de la télédétection et des SIG: possibilités, erreurs et limites*. Sécheresse, 9(3) : 185-192.

Bonneau, J.M. et Souchier, B., 1979. *Constituants et propriétés du sol*, tome 2. Paris : Massbn, 459pp.

Bouchetata, T. B. et Bouchetata, A., 2005. *Dégradation des écosystèmes steppiques et stratégie de développement durable. Mise au point méthodologique appliquée à la wilaya de Nâama (Algérie).*Développement durable et territoires [Enligne] URL: http://developpement-durable .revues .org/1339.

Boumedienne, M.A., 2010. *Effet de l'application des boues d'épuration sur la biomasse de la culture d'orge en sec et sur l'état de surface d'un sol dans la région de Laghouat*. Mémoire d'Ingéniorat : Université d'Amar Thelidji de Laghouat. 79p.

Bourbouze, A., 2000. *Pastoralisme au Maghreb : la révolution silencieuse*. Ciheam / IAM de Montpellier 19 p.

Brifaux, G., 1991. *Pratique de l'expérimentation aux champs, cas des céréales*, ITCF, 95p .France.

Buschiazzo, DE., Zobeck, TM., 2005. *Airborne horizontal mass flux calculated with different equations*. 2005, Annual ASAE Annual International Meeting, Tampa, Florida, 17–20 July.

Buschiazzo, D.E., 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, p1839–1850 (2008)

Butterfield ,G.R., 1991. *Grain transport rates in steady and unsteady turbulent airflows.* Acta Mechanica, 1:123-134.

Caplat, G., 2008. *Modèles et Métamodèles. Presses polytechniques et universitaires romandes*, INSA Lyon, p. 197

Casenave, A et Valentin, C., 1996. *Etats de surface et transposition des données hydrologiques*. L'hydrologie tropicale : géoscience e/ outil pour le développement (Actes de la conférence de Paris, mai 1995)2 IAHS Pub no. 238, 25.

Chappell, A., 1996. *Modelling the spatial variation of processes in the redistribution of soil: digital terrain models and 137Cs in southwest Niger*. Cïeomorphology, 17(1-3): 249-261.

Chaumont, M. et Paquin, C., 1971. *Carte pluviométrique de l'Algérie au 1/500.000*.Soc. Hist. Nat. Afr. Nord, Alger, 24p. + Cartes (4 feuilles).

Chehma, A., 2005 . *Etude floristique et nutritive des parcours camelin du Sahara septentrional Algérien*. Thèse doctorat, Univ. Badji Mokhtar, Annaba, 178p.

Chehma, A., Djebar, M.R., Hadjaiji, F., Rouabeh, L., 2005. *Étude floristique spatio-temporelle des parcours sahariens du sud-est algérien*. Sécheresse. 16, 4, 275-85.

Chepil ,W.S., 1955. *Factors that influence clod structure and erodibility of soil by wind*: *IV.Sand, Silt and Clay*. Soil science, 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 analysi*. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 26(1): 4-6.

Chepil, W. S. et Woodruff, N. P., 1954. *Estimations of wind erodibility of field surfaces*. J. Soil Water Conserv. 9:p257-265, 285

Chepil, W.S., 1944. *Utilization of crop residues for wind érosion control*. Science in Agriculture, 24: 307-319.

Chepil, W.S., 1945. *Dynamics of wind érosion: IV. The translocating and abrasive action of the wind*. Soil Science, 61: 167-177

Chepil, W.S., 1951. Properties of soil which influence wind érosion: IV. State of dryaggregate structure. Soil Science, 72: 387-401.

Chevrier, M., 2002. *Potentiel de la télédétection hyperspectrale pour la cartographie des résidus de culture. Thèse de maîtrise. Département de Géographie*.Université d'Ottawa, 174 pages.

Combeau, A., 1977. *Erosion et Conservation des Sols*. ORSTOM, Paris, 85 p.

Conservation des forêts., 2006. *La restauration, bilan,évaluation, perspectives*. Rapport, 5 p.

Cooke, R.U., Warren, A. et Goudie, A.S., 1993. *Desert geomorphology*. London, ECL Press, 526 pages.

Cornelis, W.M., Gabriels, D., De gryse, S., Hartmann ,R., 2000. *L'efficacité de brise-vent végétaux dans la lutte contre l'érosion éolienne : expérimentation sur modèles réduits*. Secheresse, note méthodologique, 11 (1), p52-57.

CSDF comité scientifique français de la désertification., 2002. *les projets dee developpement en Afrique subsahrienne et le Maghreb, ouvrage collectif derigé par Philipe Jouve*.France

DPSL :Direction de Planification et des Statistiques., 2010. *Direction de la planification de wilaya de Laghouat*. 2010.*Monoghraphie de la wilaya de Laghouat*, rapport annuel 2010 ,305 p.

DSA :Direction des Services Agricoles., 2011. *Schéma directeur de la wilaya. Laghouat*. 108 p.

Daget, Ph. et Djellouli, Y., 1991. *Le climat méditerranéen change t-il ? La séchresse à Alger au cours des cent dernières années*? Pub. Assoc. Intern. Climatologie, 4, 187-195.

Daget, Ph., Poissonet, J., 1971. *Une méthode d'analyse phytologique des prairies, Critère d'application. Ann. Agron.*, vol. 22, n. 1. p. 5-41.

Dajoz, R., 2006. *Précis d'écologie*.8e Edition : Dunod, Paris, 631p

Dalage, A et Métailié, G., 2000. *Dictionnaire de biogéographie végétale*. Ed. CNRS, Paris, 579p.

Damnati, B,. Sanae, I. et Radakovitch, O., 2004. *Utilisation du césium-137 pour l'estimation des taux d'érosion dans un bassin versant au nord du Maroc*. Sécheresse, 15(2): 195-199

Derruau, M., 1967 : *Précis de géomorphologie*. Ed : Masson, Paris. 415 pages.

Dictionnaire Hachette., 2012. Disponible sur http://dictionnaire.reverso.net/ francais-definition/hachelte

Djebaili S., Djellouli. Y. et Daget P., 1989. *Les steppes pâturées des Hauts Plateaux algériens*. Fourrages.120: 393-400.

Djebaili, S., 1984. *Steppe algérienne phytosociologie et écologie*. O.P.U.177 p.

Djebaili, S., 1978. *Recherches phytosociologiques sur la végétation des hautes plaines steppiques et de l'Atlas saharien algérien*. Thèse doctorat es-science, Université Montpellier. 229 p.

Djekidel, S., 2014. *Analyse des sédiments éoliens d'une parcelle cultivée à l'orge en pluviale***.** Mem Ingenieur.Université de Laghouat. 50 p.

Djellouli, y., 1990. *Flores et climats en Algérie septentrionales, déterminismes climatiques de la répartition des plantes*. Thèse doctorat. USTHB, Alger. 210 p.

Djoubar, S., 2011. *Contribution à l'étude de la structure d'un parcours steppique mis en défend « Choucha » dans la région de Laghouat. Mémoire d'Ingéniorat*. Université d'Amar Thelidji de Laghouat. 69p.

Dogget, A.L., Gill, T.E., Peterson, R.E., Bory, AJ.M.et Biscaye, P.E., (2003). Meteorological characteristics of a severe wind and dust émission eve.nl; soutliwestern USA, 6-7 April 2001.

Dubief, J.,1952. *Le vent et le déplacement du sable au Sahara*. Travaux de l'institut de Recherches Sahariennes. t. VIII, p123-162

Duchauffour, PH., 1977. *Pédologie, Pédogenèse et classification*. Tome I, Edition : Masson, Paris, 477p.

Enne, G., Zucca, C., Montoldi, A. et Noe, L., 2004. *The role of grazing in agropastoral systems in the mediterranean region and their environmental sustainability*. Advances in GeoEcology, 37, 29-46

FAO., 1988. *Manuel de fixation des dunes*. Cahiers Conservation n°18, Rome, 68p

FAO., 2009. *Agronomie durable* : principes et pratiques, 46p

FAO., 2011. *The state of the world's land and water resources for food and agriculture (SOLAW) - Managing systems at risk*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome and Earthscan, London.

Fryrear, D. W. et Armbrust D. V., 1968. *Wind erosion control with cotton gin trash*. Texas Agr. Exp. Sta. Consolidated PR-2621:12-13

Fryrear, D.W et Saleh, A,. 1996. *Wind erosion: Field length*. Soil Sci. 161(6):398-404.

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., Saleh, A., J.D. Bilbro, H.M. Schomberg, J.E. Stout, and T.M. Zobeck.1998 b. *Revised Wind Erosion Equation (RWEQ)*. Wind Erosion and Water Conservation Research Unit, USDA-ARS, Southern Plains Area Cropping Systems Research Laboratory.Technical Bulletin No. 1.

Fryrear, D.W., 1995. *Soil Losses by Wind Erosion*. Sol Sci. Soc.Am.J.,59: 668-672.

Fryrear, D.W., 2000. *Wind érosion*. Handbook of Soil Science, M.E. Su miner (Ed.), CRC Press, G-195-G-196.

Fryrear, D.W., Krammes ,C.A., Williamson ,D.L et Zobeck, T.M., 1994. *Computing the wind erodible fraction of soils*. J. Soil Water Conserv. 49(2): 183-188.

Gardi, R., 1973. *Sahara*. Ed: Kummerly et Frey, Paris, 3ème Edition. 49-51pp

Gaussen, H., 1948. *Carte des précipitations annuelles de l'Algérie*. I.G.N.

Ghazi, A. et Lahouati, R., 1997. *Algérie 2010, sols et ressources biologiques*. Alger: Institut national des études de stratégie globale (INESG), 39p.

Gillette, D.A. et Walker, T.R., 1977. *Characteristics of airbone part ides produced by wind érosion of sandy soil, high planes of West Texas*. Soil science, 123 : 97-110.

Graa, S., 2010. *Contribution à l'étude de la dégradation des parcours steppiques dans la région de Laghouat. Mémoire d'Ingéniorat*. Université d'Amar Thelidji de Laghouat. 74p.

Gréco, J., 1979. *La défense des sols contre l'érosion*. Édit. La Maison Rustique, Paris, 183 p.

Guendouz, A., 2005. *Ecophysiologie et biogéographie du criquet pérlin (Schistocera gregaria) dans le sud Algérien*. Thèse doc. d'Etat en agronomie, INA, EL Harrach, Alger, 210p.

Guéttouche, 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

Hagen, L.J., 1999. *Wind Erosion Prédiction System: Erosion Submodel*. 50lh International SymposiumAVorkshop on Wind Erosion, USDA et Kansas State University, 9 p.

Hagen, L.J., Skidmore, E.L et Saleh, A., 1992. *Wind érosion: Prédiction of aggregate abrasion coefficients*. Trans. ASAE. 35(6): 1847-1850

Halitim, A., 1988. *Les sols des régions arides d'Algérie*. Ed. OPU, Algérie, 384p.

Hammouda, R., 2009. *Contribution à élaboration d'un modèle de gestion durable d'un parcours steppique dans commune de Hadj Mechri wilaya de Laghouat*. Thèse de Magister : USTHB. Alger. 124p.

Hillel, D.J., 1991. *Out of the earth: Civilization and the life of the soil*. The Free Press, New York.

Hirche, A. R., 2010. *Contribution à l'évaluation de l'apport de la télédétection spatiale dans la dynamique des écosystèmes en zones arides : cas du sud oranais*. Thèse Doctorat. Es Science, USTHB. Alger, 327 p. + Ann.

Hirche, A., Boughani, A. et Salamani, M., 2007. *Évolution de la pluviosité annuelle dans quelques stations arides algériennes*. *Sécheresse* 18 (4), 314-20.

Houyou, Z., Bielders, C.L., Benhorma, H.A., Dellal, A., et Boutemdjet, 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.* DOI: 10.1002/ldr.2295DOI- Land Degradation and Development.

Katyal, J.C. et Vlek P.L.G., 2000. *Desertification: concept, causes and amelioration, ZEF*, Discussion Papers on Development Policy 33, Bonn, 65 pp.

Kay, B.D. et Angers, D.A., 1999. *Soil Structure. Dans Handbook of Soil Science.* Sous la direction de M.E. Summer. CRC Press Inc., Boca Raton Fl. p. A229-A276.

Khadraoui, A., (2004). *Eaux et sols en Algérie (Gestion et impact sur l'environnement)*.Ed. Houma. Ouargla. Algérie, 393p.

Khelifi, A., 2008. *Rendement des plantes spontanées de quelques parcours steppiques la région de Laghouat. Mémoire d'Ingéniorat*. Université d'Amar Thelidji de Laghouat. 60p.

Lahmar, R. et 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 vol. 16, n°4, 318-323, juillet-aout 2007.

Le Floc'h, E., 2008. *Guide méthodologique pour l'étude et le suivi de la flore et de la végétation* .Ed .Roselt/OSS., montpellier ,174 P.

Le Houérou, H.N., 1988. *Inter-annual variability of rainfall and its ecological and managerial consequences on natural vegetation, crops and livestock in : time scales and water stress.* DI CASTRI et *al.* Ed. I.U.B.B., Paris, 323-326.

Le Houerou, H.N., 1995. *Bioclimatologie et biogéographie des steppes arides du Nord de l'Afrique-Diversité biologique, développement durable et désertisation*. Options méditerranéennes. CIHEAM. Montpellier Série B : Etudes et recherches n° 10, 397p.

Le Houérou, H.N., 2005. *Problèmes écologiques du développement de l'élevage en région sèche. Sécheresse* (Paris), vol. 16, no 2, pp. 89-96.

Lelubre, M., 1952. *Conditions structurales et formes de relief dans le Sahara.* Ed: Inst. Rech. Saha., Alger, Tome VIII. pp.189 -190.

Leys, J. et Mc Tainsh, G., 1994. *Soil loss and nutrient décliné by wind erosion-cause for concern.* Australian Journal of Soil and Water Conservation, 7: 30-40.

Logie, M., 1982. *Influence of rougîmess element and soil moisture on the résistance of sand to wind érosion.* Catena supplément, 1: 161 -173.

Lyles, L., 1980. *The U.S. wind érosion problem.* Amer. Soc. Agr. Engin. Publication 7- 81, Proc. of the ASAE Conf. on Crop Production with Conservation in the 80s, December 1-2, 1980, Chicago, Illinois: 16-24.

Lyles, L., 1988. *Basic wind érosion processes*. Agriculture, Ecosystems and Environment, 22/23: 91 - 101.

MADR :Ministère de l'Agriculture et du Développement rural., 2006. (Direction des statistiques agricoles et systèmes d'information. *Rapport sur la situation du secteur agricole*. Alger. 77 pp.)

Mabutt, J.A., 1984. *A new global assessment of the status and trends of desertication environmental conservation.*Soil environnement.11, p11-113.

Madani, D., 2008 : *Relation entre le couvert végétal et les conditions édaphiques en zone a déficit hydrique*. Mémoire de magister. Université de Batna. 165p

Mainguet M., 1994. *Desertification-Natural Background and Human Mismanagement*. Springer-Verlag, Berlin, Germany.

Mainguet, M et Dumay, F., 2006. *Combattre l'érosion éolienne : un volet de la lutte contre la désertification*. Les dossiers thématiques du CSFD. N°3. Avril 2006. CSFD/Agropolis, Montpellier, France. 44 p.

Mainguet, M. & Dumay F., 2011. *Fighting wind erosion: one aspect of the combat against desertification*. Les dossiers thématiques du CSFD. N°3. CSFD/Agropolis International, Montpellier, France. 44 pp.

Mainguet, M., 1984. *A classification of dune: based on aeolian dynamics and the sand budget*. in £1-Baz (1984a) 31- 58

Mainguet, M., Chemin, M.C., 1978. *Localisation d'une unité écologique expérimentale dans la region de Maradi (Niger): Précipitations et vents dans le Sahel de la république du Niger et étude des variations dues r une crise climatique (1968-1973).*Rapport 4, ACC-Lutte contre les effets de l'aridité.

Maselli, D., 1995. *L'écosystème montagnard agro-pastoral de Tagoundaft (haut atlas occidental, Maroc) : ressources, processus et problèmes d'une utilisation durable*.university of Berne, Switzerland, African studies series A 12, Geographica bernensia. 198 p.

Mathieu, C., Pieltain, F., 1998. *Analyse physique des sols, méthodes choisies*. Paris. Ed. Lavoisier, technique et documentation. 275p.

McKenzie, R., 2009. *The effect ofWind Erosion on Soil*, Apr 13, Issue of Agri News.

Middleton, N. et Thomas, D., 1997. *World Altas of desertification*, second édition. London : PNUE/Edward Arnold, 192pp.

Monod, T, 1992. *Du désert.* Sécheresse, vol 3 n°1 : 7-24pp.

Nedjraoui, D. et Bédrani, S., 2008. *La désertification dans les steppes algériennes: causes, impacts et actions de lutte*.VetigO-la revue en sciences de l'environnement. Volume 8 Numéro 1.19 pp.)

Nedjraoui, D., 2002. *Evaluation des ressources pastorales des régions steppiques algériennes et définition des indicateurs de dégradation*. Options Méditerranéennes, Alger, 239-243 pp.

Nedjraoui, D., 2003. *Country pasture, forage ressource profils*. ed. FAO. Grassland and pasture crops Algérie, pp: 1-29.

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.

Oades, J.M., 1993. *The rôle of biology in the formation, stabilizanon and dégradation of soil structure.* Geoderma, 56: 337-400

Ozenda, P., 1977. *Flore du Sahara*.2*ème* Ed.*CNRS.* Paris. 15,Quai Anatole-France-75700 Paris.622 p.

Ozenda, P., 1991. *Flore et végétation du Sahara*. 3e Ed. Centre National de la Recherche Scientifique, Paris.

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.

PNAE-DD., 2002. Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement. *Plan National d'Actions pour l'Environnement et le Développement Durable*. (PNAE-DD) Janvier 2002.83 p

PNUE., 2002. *Rapport annuel*. http://www.unep.org/french/pdf/PNUEen2002.pdf

Pope, C.A., 2000. *Epidemiology of fine particulate air pollution and human Health : Biologie mechanisms and who's at risk ?* Environmental Health and Perspectives, 108: 713-723

Pouget, M., 1980. *Les relations sol-végétation dans les steppes sud-algéroises.* Thèse. Doc. D'état. Uni. D'Aix-Marseille III, Editions O.R.S.T.O.M., Paris. 466p.

Prospero, J. M., June., 2006. *Saharian Dust Impacts and Climate Change, case study*. Oceanography Vol. 19, No. 2, p60-61

Quezel, P. et Santa S., 1962. *Nouvelle flore de l'Algérie et des régions désertiques méridionales.* CNRS Paris. Tome 1, 565p.

Quezel, P. et Santa S., 1963. *Nouvelle flore de l'Algérie et des régions désertiques méridionales.* CNRS Paris.Tome 2, 1170p.

Rahmoun, S., 2009. *Etude diachronique de la végétation spontanée dans la région de Laghouat. Mémoire d'Ingéniorat*. Université d'Amar Thelidji de Laghouat. 62p.

Rajot, J.L., 2001. *Wind blown sediment mass budget of Sahelian village land units in Niger.* Bulletin de la Société Géologique de France 5, 523–531.

Rajot, J.L., Karambiri, H., Ribolzi, O., Plancon, O et 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, pp. 17-30.

Ramade, F., 2003. *Eléments d'écologie (Ecologie fondamentale).*3ème Ed. Dunod, Paris, 690p.

Rochez, B., 2010. *Impact de la mise en culture sur l'érosion éolienne à Laghouat,* Algérie. Mémoire de Master. UCL .129p.

Rognon, P., Arrué, J.L. et Coudé-Gaussen, G., 1997. *Paramètres pédologiques intervenant dans l'érosion éolienne en régions sèches méditerranéennes.* Sécheresse, 8(2), 109-116.

Samani Z.A. et Pessarakli M., 1986. *Estiming potential crop evapotranspiration with minimum data in Arizona*. Trans. ASAE 29(2): 522-524.

Seltzer, P., **1946**. *Le climat de l'Algérie*, Univ. d'Alger, IMPG Carbonnel, Alger.

Serdoun, M., 2009. *Caractérisation de la végétation des quelques dépression fermées (daya) au sud de Laghouat. Mémoire d'Ingéniorat.* Université d'Amar Thelidji de Laghouat. 84p.

Shao, Y., 2000. *Physics and Modelling of wind erosion. Atmospheric and Oceanographic sciences, Library*. Kluwer academic publisher 128

Shi, P., Yan, P., Yuan, Y. et Nearing, M.A., 2004. *Wind erosion research in China: past, present and future.* Progress in Physical Geography, 28(3): 366-386.

Siddoway F.H, et Woodruff, N.P.,1965. *A wind erosion equation*. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 29(5):602-608.

Skidmore, E.L. et Hagen, J.L., 1977. *Reducing wind erosion with barriers*. Transactions of the Asae 20, 911-915.

Skidmore, E.L., Nossaman, N.L et Woodruff, N.P., 1966. *Wind érosion as influenced by row spacing, row direction, and grain sorghum population.* Soil Sci. Soc. Am. Proc. 30(4): 505-509.

Slimani, H., Aidoud, A., et Rozé, F. 2010. *30 years of protection and monitoring of a steppic rangeland undergoing desertification*. Journal of arid Environments.74, 685-691.

Smaling E., Stoorvagel J.J. et Windmeijer P.N. 1993. *Calculating soil nutrient balances in Africa at different scales 2*. Districal scale Fert Res, 35: 237-50.

Soane, B.D., 1990. *The rôle of organic matter in soil compactibility: A review of some practical aspects*. Soil and Tillage Reseauch, 16: 1-2.

Sterk, G, .2003. *Causes, consequences and control of wind erosion in Sahelian Africa*. Land Degradation & Development.14: 95-108.

Sterk, G. 1997. *Wind érosion 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., Spaan, WP., 1997. *Wind erosion control with crop residues in the Sahel*. Soil Sci. Soc. Am. J, 61: 911-917.

Sterk, G., Stein, A., 1997. *Mapping Wind-Blown Mass Transport by Modeling Variability in Space and Time*. Soil Science Society of America Journal 61, 232-239.

Stolte, J., 2003. *effects of land use and infiltration behavior on soil conservation strategy*. PhD Thesis, Wageningen university, Netherlands.

Stone, R. P. et Moore ,N., 1996. *Control of Soil Erosion*. OMAFRA, Factsheet No. 86-092. Disponible sur : http://www.omafra.gov.on.ca/english/engineer/faeis/95-089.htm.

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.

Tidjani, A. D. (2008). *Erosion éolienne dans le Damagaram Est (Sud-Est du Niger) :133 Bibliographie Paramétrisation, quantification et moyens de lutte. Thèse de doctorat*.Université catholique de Louvain-la-neuve, Belgique.

Tisdall, J.M et Oades, J.M., 1982. *Organic matter rand water-stable aggrega*tes .1. Soil Scir 33(2): 141-163.

Toy, T.J., Foster, G.R. et Renard, K.G., 2002. *Soil Erosion, Processes, Prédiction, Measurement, and Control*. John Wiley &Sons, Inc.

UNEP., 2000. *World Atlas of Desertification.*London, Edward Arnold.

USDA- Agricultural Research Service,. 1961. *A universal equation for measuring wind erosion,* USDA-ARS. 22-69, 22p

USDA-NRCS., 2002. *National Agronomy Manual*, 3e Edition, 502-1 î\ 502-103.

USGS., 2012 . *Eolian processes http://pubs.usgs.gov/gip/deserts/eolian/ Dernière consultation en 2013*.

Utell, M. et Samet, J., 1996. *Airborne particulates and respiratory disease: Clinical and pathogenic considérations. Particles in Our Air, Concentrations and Health Effects*. Boston, Harvard University Press, 169-188.

Van Pelt, R.S., Zobeck, T.M., Potter, K.N., Stout, J.E. et 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. et Karssenberg, D., 2005. *Wind erosion modeling in a Sahelian environment.* Environment Modelling & Software, 20(1): 69-84.

Wael, E., Bouiadjra, S.E.B., Benslimane, M., et Mederbal, K., 2009. *L'écosystème steppique face à la désertification : cas de la région d'El Bayadh, Algérie.* [Vertigo] La revue électronique en sciences de l'environnement, 9 (2).

Willet. B.B., 1983. *Transport by wind of granular materials of differents grain shape and densities*. Sedimentology 30, 669-680.

Wilson, S.J. et Cooke R.U., 1980. *Wind erosion*, p. 217-251. In M.J. Kirkby and R.P.C. Morgan (ed.) Soil Erosion. John Wiley & Sons, Chichester, UK.

Windisch, E. J., 1999. *Mécanique des sols. Essais de laboratoire*. École de technologie supérieure. 108p.

Xie, Y. et Wittig, R., 2004. *The impact of grazing intensity on soil characteristics of Stipa grandis and Stipa bungeana steppe in NorthChina (autonomous region of Ningxia). Acta Oecologica*, 25, 197-204.

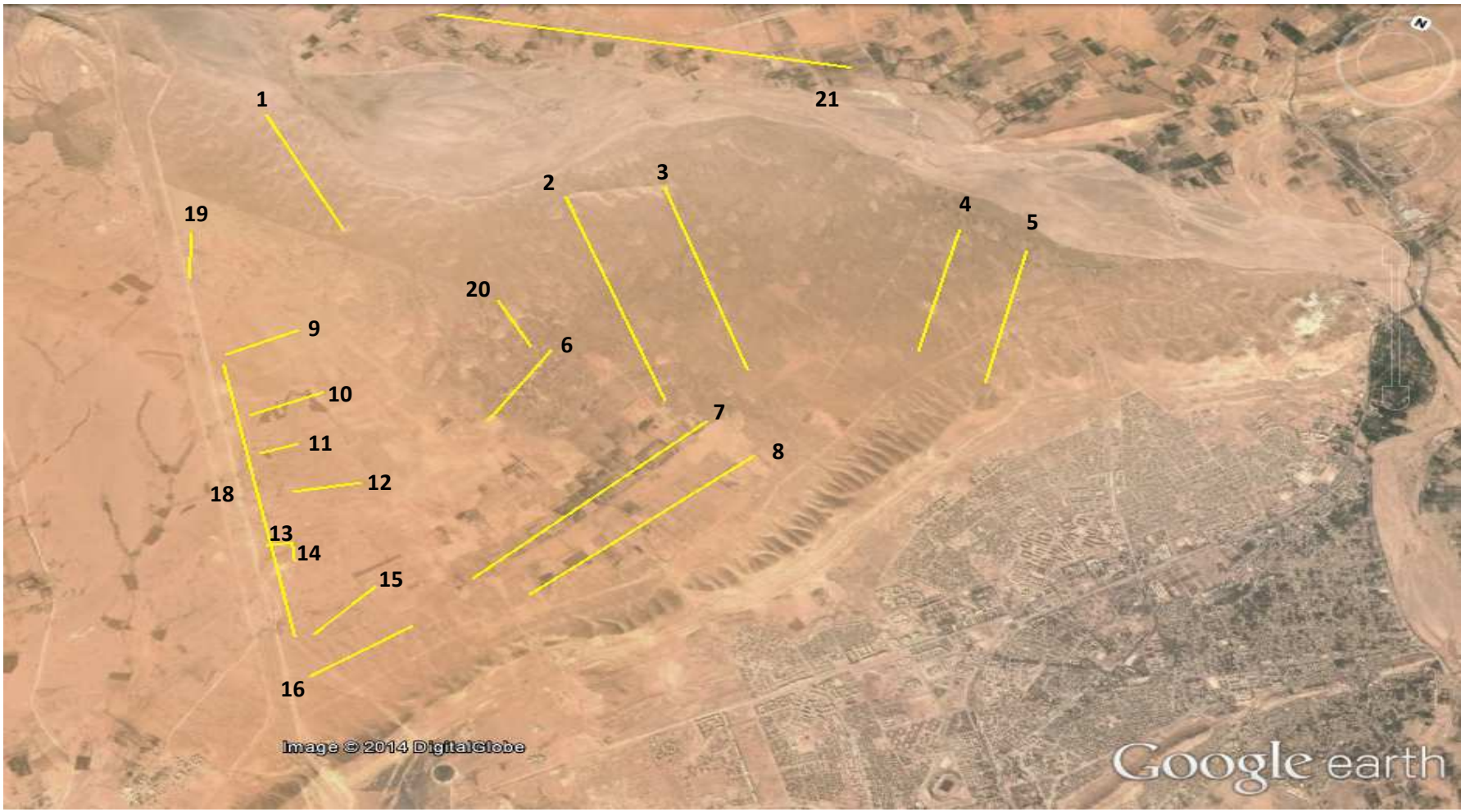
Yong-Zhong, S., Yu-Lin, L., Jian-Yuan, C. et Wen-Zhi, Z., 2005. *Influences of continuous grazing and livestock exclusion on soil properties in a degraded sandy grassland, Inner Mongolia, northern China*. *Catena*, 59, 267-278.

Zingg, A.W., 1953. *Some characteristics of aeolian sand movement by saltation process*. pp. 197-208. Editions du centre National de la Recherche Scientifique 13. Quai Anatole France, Paris, (7e) : 197-208

Zobeck ,TM., van Pelt, RS., Stout, JE., Popham, TW. **2001**. *Validation of the revised wind erosion equation (RWEQ) for single events and discrete periods.* Proceedings of the International Symposium on Soil Erosion Research for the 21th Century, 3–5 January, Honolulu; 471–474

Zobeck, T.M., Fryrear, D.W et Pettit, R.D., 1989. *Management effects on wind eroded sediment and plant nutrients. Journal of Soil and water Conservation*, 44: 160- 163.

Annexe 1 : Localisation des transects.

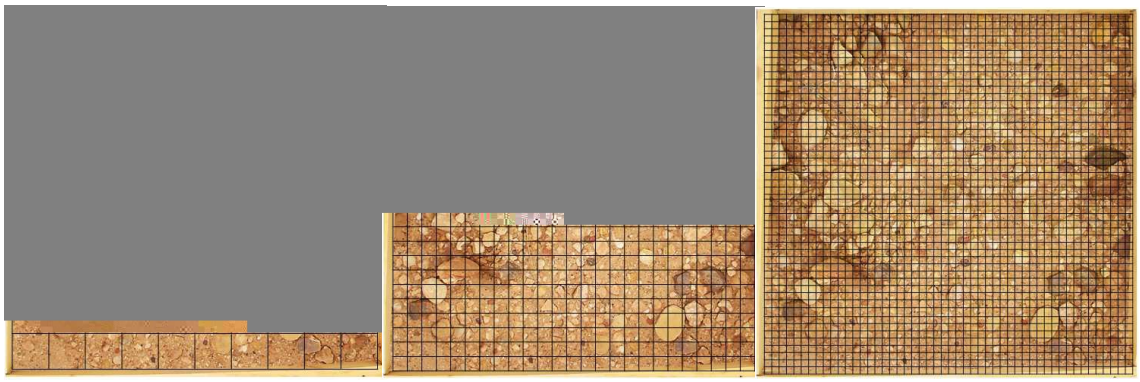


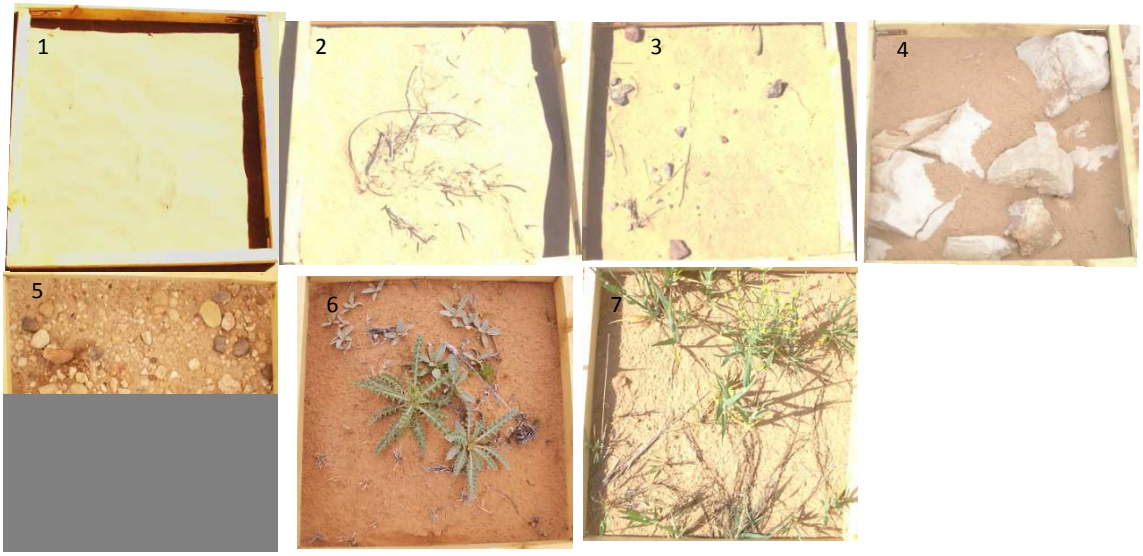
Annexe 2 : Coordonnées spatiales de l'ensemble des points de mesure.

N°	N	E	N°	N	E	N°	N	E
1*1	33° 49' 19,0"	002° 46' 15,0"	**20*1**	33° 48' 43,2"	002° 48' 0,8"	**5*6**	33° 49' 28,9"	002° 50' 29,6"
1*22	33° 49' 10,1"	002° 46' 26,7"	**20*2**	33° 48' 39,6"	002° 48' 6,5"	**5*71**	33° 49' 16,9"	002° 50' 30,1"
1*3	33° 49' 02,2"	002° 46' 41,0"	**20*8**	33° 48' 31,4"	002° 48' 19,7"	**6*8**	33° 48' 31,0"	002° 48' 26,6"
1*8	33° 48' 48,4"	002° 47' 2,6"	**4*4**	33° 49' 37,9"	002° 50' 8,7"	**7*5**	33° 48' 6,6"	002° 49' 13,5"
2*20	33° 49' 23,1"	002° 48' 06,0"	**4*7**	33° 49' 28,9"	002° 50' 9,4"	**7*6**	33° 48' 02,6"	002° 49' 11,7"
2*5	33° 49'06,1"	002° 48' 26,2"	**5*2**	33° 49' 52,0"	002° 50' 24,4"	**7*82**	33° 47' 26,3"	002° 48' 55,4"
3*1	33° 49' 42,1"	002° 48' 27,4"	**5*4**	33° 49' 41,6"	002° 50' 27,5"	**8*11**	33° 48' 9,8"	002° 49' 35,5"
4*2	33° 49' 59,7"	002° 50' 3,4"	**6*1**	33° 48' 2,6"	002° 48' 21,1"	**8*13**	33° 47' 54,0"	002° 49' 27,4"
5*3	33° 49' 46,3"	002° 50' 25,4"	**7*1**	33° 48' 27,8"	002° 49' 22,5"	**8*8**	33° 47' 13,4"	002° 49' 3,3"
5*8	33° 49' 11,8"	002° 50' 34,1"	**7*2**	33° 48' 24,3"	002° 49' 21,2"	**8*6**	33° 47' 31,7"	002° 49' 16,2"
1*23	33° 49' 13,5"	002° 46' 21,9"	**7*4**	33° 48' 13,7"	002° 49' 17,1"	**10*4**	33° 47' 38,8"	002° 47' 16,3"
1*2	33° 49' 5,4"	002° 46' 35,4"	**7*7**	33° 47' 59,3"	002° 49' 9,8"	**10*6**	33° 47' 46,3"	002° 47' 22,7"
1*4	33° 49' 00,2"	002° 46' 44,9"	**7*70**	33° 47' 54,3"	002° 49' 7,9"	**10*8**	33° 47' 52,7"	002° 47' 29,6"
1*6	33° 48' 56,8"	002° 46' 50,6"	**7*71**	33° 47' 48,9"	002° 49' 5,0"	**13*1**	33° 46' 58,7"	002° 47' 42,8"
2*2	33° 49' 15,7"	002° 48' 14,5"	**7*83**	33° 47' 40,9"	002° 49' 4,2"	**13*3**	33° 47' 0,4"	002° 47' 45,3"
2*4	33° 49' 09,0"	002° 48' 23,1"	**7*81**	33° 47' 17,2"	002° 48' 51,0"	**14*2**	33° 46' 59,8"	002° 47' 51,7"
2*6	33° 48' 48,0"	002° 48' 45,0"	**7*8**	33° 47' 11,8"	002° 48' 45,1"	**14*8**	33° 46' 56,9"	002° 47' 53,8"
2*8	33° 48' 29,6"	002° 49' 7,1"	**8*10**	33° 48' 13,4"	002° 49' 36,8"	**16*1**	33° 46' 25,2"	002° 48' 18,6"
3*3	33° 49'24,0"	002° 48' 47,2"	**8*12**	33° 48' 1,4"	002° 49' 31,3"	**16*6**	33° 46' 38,4"	002° 48' 27,6"
3*5	33° 49'15,3"	002° 48' 54,9"	**8*7**	33° 47' 17,6"	002° 49' 9,0"	**16*7**	33° 46' 44,1"	002° 48' 33,1"
3*6	33° 49' 6,8"	002° 49' 02,5"	**8*5**	33° 47' 34,0"	002° 49' 17,1"	**16*8**	33° 46' 51,2"	002° 48' 37,3"
3*71	33° 49' 00,0"	002° 49' 09,4"	**8*4**	33° 47' 38,5"	002° 49' 17,5"	**18*1**	33° 46' 35,1"	002° 48' 7,4"
4*1	33° 50' 2,5"	002° 50' 1,5"	**8*2**	33° 47' 47,9"	002° 49' 19,2"	**18*23**	33° 46' 49,8"	002° 47' 54,9"
4*3	33° 49' 43,2"	002° 50' 7,9"	**9*1**	33° 47' 53,3"	002° 46' 54,4"	**18*22**	33° 46' 54,1"	002° 47' 51,4"
4*5	33° 49' 36,6"	002° 50' 8,6"	**9*2**	33° 47' 54,4"	002° 46' 55,8"	**18*20**	33° 47' 1,8"	002° 47' 44,5"
4*6	33° 49' 33,3"	002° 50' 9,1"	**9*3**	33° 47' 59,0"	002° 46' 59,1"	**18*3**	33° 47' 15,0"	002° 47' 30,3"
4*8	33° 49' 15,2"	002° 50' 10,1"	**10*5**	33° 47' 44,7"	002° 47' 21,0"	**18*5**	33° 47' 37,4"	002° 47' 6,2"
5*1	33° 50' 3,0"	002° 50' 24,5"	**10*7**	33° 47' 49,5"	002° 47' 26,4"	**18*6**	33° 47' 41,7"	002° 47' 2,4"
5*5	33° 49' 38,0"	002° 50' 27,7"	**11*7**	33° 47' 27,7"	002° 47' 26,4"	**18*7**	33° 47'45,20"	002° 47' 1,0"
5*7	33° 49' 26,7"	002° 50' 29,2"	**11*8**	33° 47' 33,3"	002° 47' 32,4"	**18*8**	33° 47' 49,8"	002° 46' 55,9"
6*2	33° 48' 6,4"	002° 48' 22,0"	**12*2**	33° 47'18.96"	002° 47' 42.27"	**19*7**	33° 48' 20,4"	002° 46' 24,1"
6*3	33° 48' 11,9"	002° 48' 23,4"	**13*2**	33° 46' 59,5"	002° 47' 44,1"	**19*8**	33° 48' 29,2"	002° 46' 19,1"
6*4	33° 48' 15,8"	002° 48' 24,0"	**13*8**	33° 47' 2,4"	002° 47' 49,6"	**1*21**	33° 49' 08,4"	002° 46' 28,8"
7*3	33° 48' 21,4"	002° 49' 20,1"	**14*1**	33° 47' 2,14"	002° 47' 49,56"	**1*5**	33° 48' 58,6"	002° 46' 47,5"
7*80	33° 47' 14,1"	002° 48' 47,1"	**15*8**	33° 46' 59,1"	002° 48' 20,5"	**1*7**	33° 48' 51,9"	002° 46' 57,8"
8*1	33° 49' 26,5"	002° 48' 0,5"	**18*24**	33° 46' 40,4"	002° 48' 3,1"	**2*3**	33° 49' 10,1"	002° 48' 21,9"
8*3	33° 47' 43,2"	002° 49' 20,3"	**18*21**	33° 46' 57,1"	002° 47' 47,7"	**2*7**	33° 48' 44,8"	002° 48' 50,4"
9*4	33°48'6.34"	002°47'6.45"	**18*2**	33° 47' 11,1"	002° 47' 34,4"	**3*2**	33° 49' 27,2"	002° 48' 42,6"
12*1	33° 47' 18,0"	002° 47' 40,3"	**18*4**	33° 47' 20,8"	002° 47' 24,4"	**3*4**	33° 49' 20,5"	002° 48' 50,9"
15*1	33° 46' 37,8"	002° 48' 12,1"	**21*1**	33° 50' 16,9"	002° 46' 44,2"	**20*3**	33° 48' 36,5"	002° 48' 11,9"
16*4	33° 46' 31,9"	002° 48' 24,3"	**2*1**	33° 49' 26,7"	002° 46' 0,5"	**16*4**	33° 46' 31,9"	002° 48' 24,3"
16*5	33° 46' 36,2"	002° 48' 26,6"	**3*7**	33° 49' 02,8"	002° 49' 05,9"	**16*5**	33° 46' 36,2"	002° 48' 26,6"

Annexe 3 : Choix de la grille

- Essais de grille. (g) 1 maille : 5 cm (centre) 1 maille : 2 cm (dr) 1 maille : 1 cm





- Combinaisons résidus végétaux-charge caillouteuse sur lequel les essais ont été effectués

- % de couverture total au sol

N° essai	Maille : 5 cm Couverture total [%]	Maille : 2 cm Couverture total [%]	Maille : 1 cm Couverture total [%]
1	0	0,16	0,12
2	20	7,84	5,6
3	9	7,52	6,8
4	62	48,64	44,08
5	41	28,64	26
6	28	19,68	17
7	31	18,72	16,92

Essai de grilles

Annexe 4 : Résultats des coefficients de perte en sol (*SLR_f, SLR_s et SLR_c*) entrants dans le calcul du *COG* au niveau des dunes peu végétalisées en automne et au printemps.

N° au terrain	Automne			Printemps		
	SLR_f	SLR_s	SLR_c	SLR_f	SLR_s	SLR_c
1*1	1	0,995264	0,9794303	1	0,9791269	0,8314
1*22	1	0,995264	0,9794303	1	0,9791269	0,8314
1*3	1	0,995264	0,9794303	1	0,9791269	0,8314
1*8	1	0,9981718	0,9890896	1	0,9745951	0,8662
2*20	1	0,995264	0,9794303	1	0,9745951	0,8314
2*5	1	0,9916942	0,970261	1	0,9906223	0,9342
3*1	1	0,995264	0,9794303	1	0,9791269	0,8314
4*2	1	0,995264	0,9794303	1	0,9791269	0,8314
5*3	1	0,995264	0,9794303	1	0,9791269	0,8314
5*8	1	0,995264	0,9794303	1	0,9791269	0,8314

Annexe 5 : Résultats des coefficients de perte en sol (*SLR_f, SLR_s et SLR_c*) entrants dans le calcul du *COG* au niveau des petits espaces encroutés en automne et au printemps.

N° au terrain	Automne			Printemps		
	SLRf	SLRs	SLRc	SLRf	SLRs	SLRc
1*21	0,9865	0,5617	0,3141	0,9962	0,4756	0,3583
1*5	0,9873	0,5656	0,3064	0,9931	0,4756	0,3583
1*7	0,9878	0,5656	0,3064	0,9971	0,4095	0,3065
2*3	0,9871	0,5656	0,3064	0,9962	0,4756	0,2927
2*7	0,986	0,5656	0,3064	0,9963	0,4756	0,3583
3*2	0,9869	0,5656	0,3064	0,9971	0,4756	0,3583
3*4	0,987	0,5656	0,3064	0,9965	0,5632	0,5347
20*3	0,9865	0,5695	0,2988	0,9922	0,4756	0,3583

Annexe 6 : Annexe 4 : Résultats des coefficients de perte en sol (SLRf, SLRs et SLRc) entrants dans le calcul du COG au niveau des steppes ensablées en automne et au printemps.

N° au terrain	Automne			Printemps		
	SLRf	SLRs	SLRc	SLRf	SLRs	SLRc
1*23	0,9913	0,7159	0,4227	0,9978	0,4858	0,2668
1*2	0,9903	0,7159	0,4227	0,9962	0,4858	0,2668
1*4	0,9893	0,7159	0,4227	0,9963	0,4858	0,2668
1*6	0,9911	0,7159	0,4227	0,9944	0,4858	0,2668
2*2	0,9903	0,7159	0,4227	0,9973	0,4858	0,2668
2*4	0,9894	0,7159	0,4227	0,9963	0,6032	0,2083
2*6	0,9909	0,7159	0,4227	0,9973	0,4858	0,2668
2*8	0,9953	0,7159	0,4227	0,9962	0,4858	0,2668
3*3	0,991	0,7159	0,4227	0,9966	0,4858	0,2668
3*5	0,9901	0,7159	0,4227	0,9965	0,8701	0,5037
3*6	0,9892	0,7159	0,4227	0,9965	0,4858	0,2668
3*71	0,991	0,7159	0,4227	0,9965	0,4858	0,2668
4*1	0,9902	0,7159	0,4227	0,9962	0,4858	0,2668
4*3	0,9895	0,7159	0,4227	0,9962	0,4858	0,2668
4*5	0,9912	0,7159	0,4227	0,9965	0,5297	0,2646
4*6	0,99	0,7159	0,4227	0,9966	0,2965	0,1698
4*8	0,9894	0,7159	0,4227	0,9962	0,4858	0,2668
5*1	0,9955	0,7403	0,612	0,9962	0,4792	0,1868
5*5	0,992	0,7159	0,4227	0,9962	0,4858	0,2668
5*7	0,9903	0,7159	0,4227	0,9966	0,4858	0,2668
6*2	0,9941	0,7159	0,4227	0,9966	0,4858	0,2668
6*3	0,9852	0,7159	0,4227	0,9962	0,4858	0,2668
6*4	0,9932	0,7159	0,4227	0,9962	0,4858	0,2668
7*3	0,9902	0,7159	0,4227	0,9962	0,4858	0,2668
7*80	0,9909	0,7159	0,4227	0,9966	0,4858	0,2668
8*1	0,9981	0,7159	0,4227	0,9966	0,4858	0,2668
8*3	0,9893	0,7159	0,4227	0,9962	0,4858	0,2668
9*4	0,9946	0,7159	0,4227	0,9962	0,4858	0,2668
12*1	0,9849	0,7159	0,4227	0,9969	0,4858	0,2668
15*1	0,9878	0,7159	0,4227	0,9966	0,4858	0,2668
16*4	0,99	0,7159	0,4227	0,9963	0,7179	0,3491
16*5	0,9849	0,6935	0,3074	0,9962	0,3303	0,3582
20*1	0,9974	0,7159	0,4227	0,9963	0,4858	0,2668
20*2	0,991	0,7159	0,4227	0,9962	0,4858	0,2668
20*8	0,9891	0,7159	0,4227	0,9966	0,4858	0,2668

Annexe 7 : Annexe 5 : Annexe 4 : Résultats des coefficients de perte en sol (SLRf, SLRs et SLRc) entrants dans le calcul du COG au niveau des parcelles cultivées en automne et au printemps.

N° au terrain	Automne			Printemps		
	SLRf	SLRs	SLRc	SLRf	SLRs	SLRc
4*4	0,9976	0,7356	0,889	0,9995	0,4519	0,7753
4*7	0,9959	0,7356	0,889	0,9916	0,4519	0,7851
5*2	0,9963	0,7572	0,9083	0,9971	0,4184	0,7801
5*4	0,9969	0,7356	0,889	0,9971	0,4519	0,7801
6*1	0,9954	0,7356	0,889	0,9962	0,4519	0,7801
7*1	0,9798	0,7356	0,889	0,9996	0,4519	0,7801
7*2	0,9958	0,7356	0,889	0,9997	0,4519	0,7801
7*4	0,9966	0,7356	0,889	0,9996	0,4519	0,7801
7*7	0,9974	0,7356	0,889	0,9988	0,4519	0,7801
7*70	0,9967	0,7356	0,889	1	0,4519	0,7801
7*71	0,9958	0,7356	0,889	1	0,4519	0,7801
7*83	0,9969	0,7356	0,889	0,9983	0,4519	0,7801
7*81	0,9966	0,7356	0,889	0,999	0,4519	0,7801
7*8	0,996	0,7356	0,889	0,9969	0,4519	0,7801
8*10	0,9968	0,7356	0,889	0,9976	0,4519	0,7801
8*12	0,9975	0,7356	0,889	0,999	0,4519	0,7801
8*7	0,9948	0,7391	0,8814	0,9998	0,4484	0,7801
8*5	0,9967	0,7356	0,889	0,9996	0,4519	0,7801
8*4	0,9958	0,7356	0,889	0,9981	0,4519	0,7801
8*2	0,9966	0,7356	0,889	0,9982	0,4519	0,7801
9*1	0,9937	0,7356	0,889	0,9991	0,4519	0,7801
9*2	0,9972	0,7356	0,889	0,9971	0,4519	0,7801
9*3	0,9959	0,7356	0,889	0,9992	0,4519	0,7801
10*5	0,9967	0,7356	0,889	0,9996	0,4519	0,7801
10*7	0,9987	0,7356	0,889	0,9985	0,4519	0,7801
11*7	0,9978	0,7123	0,8784	0,9983	0,4941	0,7801
11*8	0,9909	0,7356	0,889	0,9989	0,4519	0,7801
12*2	0,9953	0,7356	0,889	1	0,4519	0,7801
13*2	0,9966	0,7356	0,889	0,9985	0,4519	0,7801
13*8	0,9957	0,7356	0,889	0,9987	0,4519	0,7801
14*1	0,9978	0,7356	0,889	0,9984	0,4519	0,7801
15*8	0,9969	0,7356	0,889	0,9962	0,4519	0,7801
18*24	0,9961	0,7356	0,889	0,9993	0,4519	0,7801
18*21	0,9976	0,7356	0,889	0,9984	0,4519	0,7801
18*2	0,9966	0,7356	0,889	0,9984	0,4519	0,7801
18*4	0,9958	0,7356	0,889	0,9994	0,4519	0,8166
21*1	0,9978	0,7356	0,889	0,9983	0,4519	0,7801

Annexe 8 : Annexe 5 : Annexe 4 : Résultats des coefficients de perte en sol (SLRf, SLRs et SLRc) entrants dans le calcul du COG au niveau petits plateaux caillouteux en automne et au printemps.

N° au terrain	Automne			Printemps		
	SLRf	SLRs	SLRc	SLRf	SLRs	SLRc
2*1	0,967	0,5656	0,3981	0,9954	0,5046	0,6111
3*7	0,9858	0,5656	0,3981	0,9897	0,5046	0,6111
5*6	0,9857	0,4835	0,4256	0,9907	0,4735	0,3043
5*71	0,9779	0,5656	0,3981	0,9966	0,5046	0,6111
6*5	0,9755	0,5656	0,3981	0,9885	0,5046	0,6111
7*5	0,9813	0,5656	0,3981	0,9924	0,5046	0,6111
7*6	0,982	0,5656	0,3981	0,9914	0,5046	0,6111
7*82	0,9805	0,5656	0,3981	0,997	0,5046	0,6111
8*11	0,9816	0,5656	0,3981	0,9987	0,5046	0,6111
8*13	0,9818	0,5656	0,3981	0,9958	0,5046	0,6111
8*8	0,995	0,5656	0,3981	0,9885	0,5046	0,6111
8*6	0,986	0,5656	0,3981	0,9924	0,5046	0,6111
10*4	0,987	0,5656	0,3981	0,9914	0,5046	0,6111
10*6	0,9857	0,5656	0,3981	0,997	0,5046	0,6111
10*8	0,9979	0,5656	0,3981	0,9978	0,5046	0,6111
13*1	0,9809	0,6816	0,373	0,9664	0,5046	0,3321
13*3	0,9811	0,5656	0,3981	0,9895	0,5046	0,6111
14*2	0,9817	0,5656	0,3981	0,9931	0,5046	0,6111
14*8	0,9807	0,5656	0,3981	0,9971	0,5046	0,6111
16*1	0,9854	0,5656	0,3981	0,9931	0,5046	0,6111
16*6	0,9805	0,5656	0,3981	0,9945	0,5046	0,6111
16*7	0,9806	0,5656	0,3981	0,9976	0,5396	0,6111
16*8	0,9892	0,5656	0,3981	0,9929	0,5046	0,6111
18*1	0,988	0,5656	0,3981	0,9862	0,5046	0,6111
18*23	0,9802	0,5656	0,3981	0,9816	0,5046	0,6111
18*22	0,9805	0,5656	0,3981	0,9803	0,5046	0,6111
18*20	0,9856	0,5656	0,3981	0,9789	0,5046	0,6111
18*3	0,9806	0,5656	0,3981	0,9864	0,5046	0,6111
18*5	0,9815	0,5656	0,3981	0,9868	0,5046	0,6111
18*6	0,9964	0,5656	0,3981	0,9932	0,5046	0,6111
18*7	0,9821	0,5656	0,3981	0,9833	0,5046	0,6111
18*8	0,9806	0,5656	0,3981	0,9904	0,5046	0,6111
19*7	0,9798	0,5656	0,3981	0,9904	0,5046	0,6111
19*8	0,9965	0,5656	0,3981	0,9904	0,5046	0,6111