

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
UNIVERSITE ABDELHAMID BEN BADIS MOSTAGANEM



Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département des Sciences agronomiques

Laboratoire Biodiversité et Conservation des Eaux et des Sols

Thèse

En vue de l'obtention du Diplôme de Doctorat en Sciences

Filière : Sciences Agronomiques

**Spécialité : Gestion Conservatoire des Eaux, des Sols et de
l'Environnement**

Présenté par :

M. MAAMAR KOUADRI Kaddour

Sous le thème :

**DEVELOPPEMENT D'OUTILS SPATIAUX ET CARTOGRAPHIE DES
RISQUES D'EROSION HYDRIQUE DES SOLS DANS LE TELL ORANAIS**

Soutenu publiquement, le 27/06/2019 devant le jury composé de :

M. LOTMANI Brahim	Professeur	Président	Université de Mostaganem
M. BENABDELI Khéloufi	Professeur	Examineur	Université de Mascara
Mme. CHEBOUTI-MEZIOU Nadjiba	Professeur	Examinatrice	Université de Boumerdès
M. ZAMOUM Mohamed	Directeur de Recherche	Examineur	INRF d'Alger
M. KOURI Lakhdar	Professeur	Promoteur	Université de Mostaganem

Année Universitaire 2018/2019



Dédicaces

Je tiens à rendre un vibrant hommage et à dédier mon travail à

La mémoire de mon père et ma mère

Que dieu les accueillent dans son vaste paradis

Cette thèse est aussi dédiée également

A ma femme et mes enfants Hadil, Islam et Sidra

Kaddour

Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens tout d'abord à remercier le Bon Dieu tout puissant qui m'a donné santé et courage afin de mener à terme ce travail. Je n'oublie pas aussi tous ceux qui, de près ou de loin m'ont aidé à son élaboration.

*Ma gratitude et mes remerciements les plus profonds vont à mon Directeur de thèse, Monsieur **KOURI Lakhdar**, Professeur à l'Université de Mostaganem, pour avoir proposé et dirigé ce travail, pour sa disponibilité et ses orientations tout au long de l'élaboration de ce travail.*

*J'exprime toute ma reconnaissance à Monsieur **LOTMANI Brahim**, Professeur à l'Université de Mostaganem, pour avoir fait l'honneur de présider ce jury.*

*Mes remerciements les plus cordiaux s'adressent à Monsieur **BENABDELI Khéloufi**, Professeur à l'Université de Mascara, pour avoir accepté d'examiner et évaluer ce travail.*

*Je suis très honorée de la présence de Madame **CHEBOUTI-MEZIOU Nadjiba**, Professeur à l'Université de Boumerdes, qu'elle soit profondément remerciée d'avoir accepté d'examiner ce travail.*

*Ma gratitude va également à Monsieur **ZAMOUM Mohamed**, Directeur de Recherche à l'Institut National de Recherche Forestière d'Alger, pour avoir accepté d'examiner ce travail et de participer à ce jury.*

*Mes vifs remerciements les plus cordiaux s'adressent à mes collègues, Messieurs **CHEBOUTI Yahia** et **MIHOUBI Aïssa** à l'INRF d'Alger pour le temps qu'ils m'ont toujours consacré pour m'aider tout au long de l'élaboration de cette thèse. Leurs compétences et leurs orientations ont permis d'enrichir mon travail.*

*Je tiens à exprimer aussi mes vifs remerciements à Mme **CHAHBOUB Hamida**, Maître de Recherche à l'INRF et Melle **BERKA Souhila**, Doctorante à l'USTHB pour leurs conseils et leurs commentaires qui m'ont été fort utiles.*

Résumé :

Cette étude a pour objet d'évaluer le risque d'érosion du sol dans le Tell oranais. Il s'agit de la cartographie de l'érosivité des pluies de l'ensemble du Tell oranais afin d'analyser la sensibilité des sols à l'érosion hydrique à l'échelle de deux zones test : l'embouchure du Chélif et la partie occidentale du Bassin versant de l'Oued Mina. C'est une approche basée sur une méthode d'analyse physico-chimique, mécanique et des traitements statistiques par l'analyse factorielle des correspondances permettant de trouver une relation entre les différents paramètres (intrinsèques) ayant une influence sur le phénomène d'érosion afin d'exprimer le niveau de vulnérabilité d'occupation des sols à l'érosion hydrique dans cette région semi-aride. L'application de l'approche télédétection/SIG/USLE à l'échelle de la partie occidentale du bassin versant de l'Oued Mina a permis de multiplier les cinq facteurs (R, K, LS, C, P). Chacun de ces facteurs a été analysé et exprimé sous forme de carte thématique qui nous a permis d'élaborer la carte des pertes en sol et l'identification des zones de risque pour intervenir afin de diminuer le processus érosif dans la partie occidentale du bassin versant de l'Oued Mina.

Les cartes d'érosivité des pluies élaborées ont permis de repérer des zones d'interventions prioritaires pour la conservation des sols contre l'agressivité des pluies où le risque d'érosion est potentiellement élevé. Il en ressort sur le plan spatial, que l'érosivité des pluies croît du Sud au Nord et sur le plan temporel le risque d'érosion dans le Tell oranais se manifeste en automne et en hiver.

D'après la carte des pertes en sol on estime à environ 54,5 % de la superficie de la partie occidentale du bassin versant de l'Oued Mina comme ayant subi des pertes en sol supérieures au seuil de tolérance (7,41 t/ha/an), ce qui reflète l'importance du rythme accéléré de l'érosion dans cette partie du bassin. Néanmoins, il est à signaler que ces pertes sont inégalement réparties sur le plan spatial, cela signifie que les zones fortement touchées correspondent surtout aux terrains accidentés, à lithologie fragile et à faible couvert végétal.

Un modèle d'aménagement de lutte contre le ravinement a été réalisé dans la zone où les pertes en sol sont très élevées, et le suivi a permis d'évaluer le dispositif antiérosif de correction torrentielle et reboisement mis en place en matière de coût et d'efficacité. A cet effet, les atterrissements favorisent l'étalement des eaux à la surface du lit de la ravine et entre les ravines, ce qui favorise davantage la diminution de la vitesse de l'écoulement, permettant ainsi de dissiper l'énergie des eaux de pluie et de réduire leur capacité de transport des sédiments.

Mots clés :

Tell oranais, marnes, érosivité des pluies, érosion, cartographie, USLE, aménagement.

ملخص :

الغرض من هذه الدراسة هو تقييم خطر أحت المائي في انجراف التربة على مستوى التل الوهراني. رسم خريطة عدوانية الأمطار و تحليل هشاشة التربة المعرضة إلى التآكل على نطاق منطقتي اختبار : مصب واد شلف والمنطقة الغربية لحوض منحدر واد مينا. هذا النهج يقوم على طريقة التحليل أفيزيائي الكيميائي والميكانيكي وبمساعدة المعالجة الإحصائية بالتحليل الفكري للمراسلات (AFC) سمح لنا بإيجاد العلاقة بين مختلف العوامل الجوهرية التي تساهم في ظاهرة التعرية و بالتالي معرفة مستوى الهشاشة في هذا الإقليم الشبه جاف. تطبيق نهج USLE/GIS/الإستشعار عن بعد على مستوى الجزء الغربي من الحوض منحدر واد مينا سمح بإجراء عملية مضاعفة العوامل الخمسة للحت (P، C، LS، K، R). تم تحليل كل عامل على حدى من هذه العوامل وتم التعبير عنها بخريطة مواضيعية، تجميع خرائط العوامل الخمس سمح لنا بإنشاء خريطة فقدان التربة لهذه المنطقة.

إنشاء خرائط عدوانية الأمطار سمح لنا بالتنبؤ وتوجيه وتحديد مناطق التدخل ذات الأولوية للحفاظ على التربة ضد عدوانية الأمطار وخصوصا في الأماكن التي يكون فيها خطر التآكل عاليا. على المستوى المكاني يزداد التآكل بالأمطار من الجنوب إلى الشمال و على المستوى الوقتي يتجلى فيها خطر التعرية في الخريف وفي الشتاء.

حسب خريطة فقدان التربة، تقريبا 54,5 % من مساحة هذه المنطقة تتعرض إلى فقدان للتربة لأكثر من عتبة التسامح (7,41 طن.الهكتار.السنة)، مما يبين مدى خطورة أحت المائي في هذه المنطقة وخصوصا في أماكن وجود المنحدرات و التربة الطينية الهشة التي تتميز بغطاء نباتي ضعيف. ولذلك من الضروري تقييم آثار تآكل التربة في المكان والزمان، و من أجل مواجهة هذه الظاهرة ولكي نستطيع اقتراح أفضل الاستراتيجيات تم تطوير نموذج لإدارة مكافحة الأخاديد وبالمقابل تم تقييم هذه التهيئة من الناحية المادية والفعالية في المناطق الهشة التي تعرف فقدان التربة عالي جدا.

الوضع الكارثي لمنطقة الدراسة أصبح أكثر إثارة للقلق في جميع النواحي، منه تمدد مذهب في أشكال التآكل ، الغطاء النباتي أمتدهور والسدود في حالة طمي مستمر تشكل أولية نحو تهيئة مناسبة للقضاء على الظاهرة. للحد من التدهور لاستعادة التوازن البيئي مقبول نوعا ما، من الضروري القيام بعمل والتدابير لمكافحة التعرية المقترح من قبل التصحيح الميكانيكي (تصحيح الأخاديد) والبيولوجي (التشجير).

ومن نتائج هذا التصحيح فإن عمليات التراكمات تعزز انتشار الماء على سطح السرير للأخاديد و بين الأخاديد، يزيد من تفضيل انخفاض سرعة السيالان، مما يجعل من الممكن تبديد طاقة مياه الأمطار وتقليل قدرتها على نقل الرواسب.

الكلمات المفتاحية :

التل الوهراني، الصلصال، عدوانية الأمطار، الانجراف، رسم الخرائط، USLE، تهيئة.

Abstract :

The purpose of this study is to evaluate the risk of soil erosion in the Tell of Oran. This is the mapping of the erosivity of the rains on the entire then Tell of Oran; analyze the vulnerability of soils to water erosion at the scale of two test areas: the mouth of the Cheliff and the western part of the Watershed of Wadi Mina. It is an approach based on a physical, chemical, mechanical analysis and the statistical processing by the factorial analysis of the correspondences, which makes it possible to find a relation between the various (intrinsic) parameters having an influence on the phenomenon of erosion in order to express the level of vulnerability in this semi-arid region.

The application of the remote sensing / GIS / USLE approach at the scale of the western part of the Wadi Mina watershed made it possible to multiply the five factors (R, K, LS, C, P). Each of these factors was analyzed and expressed in the form of a thematic map that allowed us, to elaborate the map of soil losses and identification of risk areas to reduce the erosion process in the western part of the Wadi Mina watershed.

The erosivity maps of the developed rains have made it possible to identify priority intervention areas for soil conservation against the aggressiveness of the rains where the risk of erosion is potentially high. From a spatial point of view, the erosivity of the rains increases from south to north, and in terms of time, the risk of erosion in the Tell of oran is apparent in autumn and winter.

According to the soil loss map, it is estimated that about 54.5 % of the western portion of the Wadi Mina watershed has suffered soil losses above the tolerance threshold (7.41 t/ha/year), reflecting the importance of the accelerated rate of erosion in this part of the basin. Nevertheless, it should be noted that these losses are unequally distributed spatially, which means that the heavily affected areas correspond mainly to hilly terrain, fragile lithology and low vegetation cover.

Gully control management model has been developed in the area with very high soil loss, and monitoring provided an assessment of the cost and effectiveness of the erosion control system. For this purpose, landings promote the spreading of water on the surface of the bed of the gully and between the gullies, which further favors the decrease of the speed of the flow, thus making it possible to dissipate the energy of the rainwater and reduce their sediment transport capacity.

Keywords:

Tell of oran, clay, aggression of rains, water erosion, mapping, USLE, planning.

SOMMAIRE

Table des matières	Pages
Introduction.....	01
 Chapitre I : Aperçu bibliographique	
1- Définition de l'érosion.....	05
1.1- Etude de l'érosivité de pluies.....	05
1.1.1- Intensité des pluies.....	06
1.1.2- Hauteur et intensité de pluie.....	07
1.1.3- Durée des pluies	07
1.1.4- Fréquence des pluies	07
1.2- Différentes formes de manifestation de la désagrégation.....	08
1.2.1- Désagrégation mécanique.....	09
1.2.2- Processus d'éclatement.....	09
1.2.3- Micro-fissuration.....	09
1.2.4- Dispersion	10
1.3 - Mécanisme de l'érosion hydrique.....	10
1.3.1- Détachement des particules de sol.....	10
1.3.2- Ruissellement.....	10
1.3.3- Sédimentation.....	11
1.4- Formes d'érosion.....	12
1.4.1- Erosion en nappe.....	12
1.4.2- Erosion linéaire.....	12
1.4.2.1- Erosion en rigoles.....	12
1.4.2.2- Erosion en ravines.....	12
1.4.2.3- Erosion en ravins.....	13
1.4.2.4- Ravinement généralisé ou badlands.....	13
1.4.2.5- Formes des ravines.....	13
1.4.2.5.1- Ravines en « V ».....	13
1.4.2.5.2- Ravines en « U »	13
1.4.2.5.3- Ravines en « tunnels ».....	14
1.4.2.5.4- Les glissements de terrain.....	14
1.4.2.5.5- L'érosion régressive.....	14
1.5- Erodibilité des sols	15
1.5.1- Indice d'érodibilité des sols (K) de Weschmeier et Smith (1978).....	15
1.5.2- Paramètres d'érodibilité des sols.....	18
1.5.2.1- Propriétés physico-chimiques.....	18
1.5.2.1.1- Perméabilité	18
1.5.2.1.2- Stabilité structurale	19
1.5.2.1.3- Granulométrie.....	19
1.5.2.1.4- Nature minéralogique	20
1.5.2.1.5- Acide humique.....	20
1.5.2.1.6- Oxydes et hydroxydes de Fer	21
1.5.2.1.7- Calcaire (CaCO ₃).....	21
1.5.2.1.8- Aptitude à la fissuration	21
1.5.2.1.9- Battance.....	21
1.5.2.2- Propriétés mécaniques	22
1.5.2.2.1- Limites d'Atterberg.....	22
1.5.2.2.1.1- Limite de liquidité WL.....	23
1.5.2.2.1.2- Limite de plasticité WP.....	23

1.5.2.2.2- Résistance au cisaillement.....	25
1.5.2.2.2.1- Essai de cisaillement rectiligne	25

Chapitre II : Caractères physiques du milieu

2- Situation géographique du Tell oranais.....	27
2.1- Caractères généraux du Tell oranais.....	27
2.1.1- Géomorphologie.....	27
2.1.1.1- Altitudes.....	27
2.1.1.2- Pentes.....	27
2.1.1.3- Expositions.....	28
2.1.1.4- Dépressions.....	29
2.1.1.4.1-Sebkha d’Oran.....	29
2.1.2- Réseau Hydrographique	30
2.1.2.1- Cours d’eau (oueds).....	30
2.1.2.1.1- Transport solide dans les Oueds du Tell oranais.....	31
2.1.3- Géologie	31
2.1.4- Pédologie.....	34
2.1.5- Occupation des sols.....	36
2.1.5.1- Groupements des dunes maritimes.....	37
2.1.5.2- Végétation steppique.....	38
2.1.5.3- Cultures pérennes et reboisements.....	38
2.1.5.4- Cultures annuelles.....	38
2.1.6- Terrains nus.....	38

Chapitre III : Etude climatique

3- Climat.....	40
3.1- Analyse du climat.....	40
3.1.1- Pluviométrie.. ..	41
3.1.1.1- Pluviométrie annuelle.....	41
3.1.1.2- Pluviométrie mensuelle.....	42
3.1.1.3- Pluviométrie saisonnière.....	43
3.1.1.4- Pluviométrie torrentielle.....	44
3.1.2- Températures	45
3.1.3- Humidité relative	46
3.1.4- Vent	47
3.1.5- Synthèse bioclimatique	49
3.1.5.1- Diagramme Ombrothermique de Bagnouls et Gaussen	49
3.1.5.2- Climagramme d’Emberger	49

Chapitre IV : Méthodologie de travail

4- Démarche méthodologique.....	52
4.1- Etude de l’érosivité des pluies dans le Tell oranais.....	52
4.1.1- Calcul des indices d’érosivité des pluies.....	52
4.1.1.1- Indice de Fournier (1960).....	53
4.1.1.2- Indice de Fournier modifié (MFI) ou (Arnoldus, 1980)	54
4.1.1.3- Formule de Rango-Arnoldus (1987).....	54
4.1.1.4- Indice de Deffontaines et De Montard (1968)	54

4.1.2- Cartographie de l'érosivité des pluies	55
4.2- Etude de l'érodibilité des sols à l'échelle de deux zones test.....	55
4.2.1- Détermination des paramètres intrinsèques des sols à l'échelle de deux zones test.....	55
4.2.1.1- Analyses physico-chimiques	56
4.2.1.2- Analyses mécaniques	59
4.2.2- Traitement statistique des résultats.....	62
4.2.2.1- Démarche d'analyse	63
4.3- Cartographie du risque d'érosion par approche (Téledétection/SIG/USLE) à l'échelle de la partie occidentale du bassin versant de l'Oued Mina.....	63
4.3.1- Localisation et caractéristiques de la partie occidentale du Bassin versant de l'Oued Mina.....	65
4.3.2- Evaluation des facteurs de l'USLE.....	65
4.3.2.1- Facteur d'érosivité de la pluie R.....	66
4.3.2.2- Facteur d'érodibilité du sol K.....	66
4.3.2.3- Facteur topographique LS.....	66
4.3.2.4- Facteur du couvert végétal C.....	67
4.3.2.5- Facteur des pratiques antiérosives P.....	68
4.3.2.6- Cartographie des pertes en sol.....	68
4.4- Application d'un modèle de lutte contre le ravinement.....	69
4.4.1- Correction mécanique.....	70
4.4.1.1- Seuil en gabion.....	70
4.4.1.2- Seuil en pierre sèche.....	71
4.4.1.3- Seuil en sacs plastiques.....	71
4.4.1.4- Seuil en traverses de bois.....	71
4.4.1.5- Seuil en pneus usagés	71
4.4.2- Correction biologique.....	71
4.4.2.1- Au niveau de la ravine.....	72
4.4.2.2- Au niveau des interfluves.....	72

Chapitre V : Résultats et Discussions

5.1- Résultats	75
5.1.1- Calcul des indices d'érosivité.....	75
5.1.1.1- Indice de Fournier	75
5.1.1.2- Indice d'Arnoldus	76
5.1.1.3- Indice de Rango-Arnoldus.....	76
5.1.2- Corrélation entre les indices d'érosivité des pluies.....	76
5.1.2.1- Coefficient de détermination entre l'indice d'Arnoldus et celui de Fournier.....	77
5.1.2.2- Coefficient de détermination entre l'indice d'Arnoldus et Rango-Arnoldus.....	77
5.1.3- Cartographie de l'érosivité des pluies dans le Tell oranais.....	77
5.1.3.1- Carte de la pluviométrie	77
5.1.3.2- Carte d'érosivité des pluies selon l'indice de Fournier.....	79
5.1.3.3- Carte d'érosivité des pluies selon l'indice d'Arnoldus.....	79
5.1.3.4- Carte d'érosivité des pluies selon l'indice de Rango-Arnoldus.....	80
5.1.3.5- Cartes saisonnières d'érosivité des pluies selon l'indice de Deffontaines.....	81
5.1.3.5.1- Carte d'érosivité des pluies en Automne.....	81
5.1.3.5.2- Carte d'érosivité des pluies en Hiver.....	82
5.1.3.5.3- Carte d'érosivité des pluies au Printemps.....	82
5.1.3.5.4- Carte d'érosivité des pluies en Été	83
5.1.4- Etude de l'érodibilité des sols à l'échelle de deux zones test.....	85

5.1.4.1- Analyse physico-chimique.....	85
5.1.4.2- Analyses mécaniques.....	91
5.1.4.3- Traitement statistique des résultats d'analyses des facteurs d'érodibilité desmarnes..	93
5.1.4.3.1- liaison entre l'érodibilité et les variables explicatives.....	93
5.1.4.3.2- Les valeurs propres.....	94
5.1.4.3.3- Inertie totale.....	94
5.1.4.3.4 - Interprétation des axes factoriels.....	94
5.1.4.3.4.1- Axe factoriel F1.....	94
5.1.4.3.4.2- Axe factoriel F2	95
5.1.4.3.4.3- Axe factoriel F3	95
5.1.4.3.4.5- Interprétations des axes factoriels.....	96
5.1.4.3.4.5.1- Axe factoriel axe1.....	96
5.1.5- Cartographie des facteurs de l'USLE dans la partie occidentale du bassin versant de l'Oued Mina	99
5.1.5.1- Facteur R.....	99
5.1.5.2- Facteur K.....	100
5.1.5.3- Facteur LS	101
5.1.5.4- Facteur C.....	102
5.1.5.5- Facteur P	103
5.1.5.6- Taux annuel de pertes en sol (E exprimé en t/ha/an).....	105
5.1.6- Elaboration d'un modèle de lutte contre le ravinement	109
5.1.6.1- Evaluation des seuils mis en place dans la stabilisation du ravinement.....	109
5.1.6.1.1- Seuil en gabion.....	109
5.1.6.1.2- Seuils en pierres sèches.....	110
5.1.6.1.3- Seuils en sacs plastiques.....	110
5.1.6.1.4- Seuils en traverses de bois	111
5.1.6.2- Démarches préconisées pour la fixation biologique.....	111
5.1.6.3- Efficacité des seuils utilisés sur la stabilité de la ravine.....	113
5.1.5.4- Impact de la réduction du ruissellement et la stabilité des ravines.....	114
5.1.6.5- Conditions et mesures de précaution pour garantir l'efficacité de l'aménagement.....	115
5.2- Discussions	117
5.2.1- Indices de l'érosivité des pluies.....	117
5.2.2- Choix d'un indice d'érosivité des pluies dans le Nord-Ouest algérien.....	118
5.2.3- Rôle de la matière organique dans la stabilité structurale	119
5.2.4- Effet des minéraux argileux sur l'évolution du sol.....	120
5.2.5- Relation entre la stabilité structurale et d'érodibilité en fonction de la lithologie.....	122
Conclusion générale.....	124
Références bibliographiques	
Annexes.....	128

Liste des Figures

Figure 1 : Effet d'une goutte de pluie (effet splash)	07
Figure 2 : Mécanismes de l'érosion hydrique (Roose, 1994)	11
Figure 3 : Flancs de ravine en «V» sur matériaux homogènes (Roose et al., 2000).....	13
Figure 4 : Ravine en «U» sur matériau hétérogène (Roose et al., 2000)	14
Figure 5 : Ravine en tunnel sur argile gonflante, gypses et matière solubles (Roose et al., 2000)	14
Figure 6 : Turbidigramme de Dumas (1965).....	16
Figure 7 : Nomogramme permettant une évaluation rapide du facteur K d'érodibilité des sols	17
Figure 8 : Erodibilité des sols en fonction du pourcentage de cailloux et du taux de matière organique.....	18
Figure 9 : Variation de la consistance d'un sol selon la teneur en eau.....	23
Figure 10 : Détermination de la limite de liquidité.....	24
Figure 11 : Localisation géographique et hypsométrie du Tell oranais.....	28
Figure 12 : Principales unités morphologiques du Tell oranais.....	29
Figure 13 : Réseau hydrographique du Tell oranais	30
Figure 14 : Carte géologique du Tell oranais	33
Figure 15 : Carte des sols de la partie Ouest du Tell oranais.....	34
Figure 16 : Carte d'occupation des sols dans le Tell oranais.....	37
Figure 17 : Pluviométrie moyenne annuelle des stations du Tell oranais (1980-2011).....	41
Figure 18 : Carte pluviométrique du Tell oranais (1986/2005).....	42
Figure 19 : Pluviométrie moyenne saisonnière des stations du Tell oranais.....	44
Figure 20 : Humidité moyenne saisonnière exprimé en % des stations du Tell oranais.....	47
Figure 21 : Moyenne mensuelle de vitesse de vent moyen exprimé en (m/s)	48
Figure 22 : Rose des vents annuels des différentes stations du Tell oranais.....	48
Figure 23 : Diagramme Ombrothermique des stations de Mostaganem et d'El Aricha.....	49
Figure 24 : Climagramme d'Emberger (1955).....	50
Figure 25 : Détermination de la limite de liquidité par l'appareil de Casagrande.....	60
Figure 26 : Roulage des boulettes sous forme des fuseaux de 3 mm.....	61
Figure 27 : La contrainte de cisaillement est celle donnée par la rupture.....	62
Figure 28 : Détermination graphique de la cohésion et l'angle de frottement	62
Figure 29 : Organigramme de la méthodologie suivie pour la cartographie du risque d'érosion.....	65
Figure 30 : Relation entre le facteur c et le NDVI.....	68
Figure 31 : Elaboration de la carte finale des pertes en sol.....	69
Figure 32 : Coefficient de détermination entre l'indice d'Arnoldus et de Fournier.....	77
Figure 33 : Coefficient de détermination entre l'indice d'Arnoldus et de Rango-Arnoldus	77
Figure 34 : Carte de répartition de la pluviométrie dans le Tell oranais.....	78
Figure 35 : Carte de répartition de l'érosivité des pluies selon Fournier dans le Tell oranais.....	79
Figure 36 : Carte de répartition de l'érosivité des pluies selon Arnoldus dans le Tell oranais.....	80
Figure 37 : Carte de répartition de l'érosivité des pluies selon Rango-Arnoldus dans le Tell oranais...	80
Figure 38 : Carte de répartition de l'érosivité en Automne selon Deffontaines dans le Tell Oranais....	81
Figure 39 : Carte de répartition de l'érosivité en Hiver selon Deffontaines dans le Tell Oranais.....	82
Figure 40 : Carte de répartition de l'érosivité en Printemps selon Deffontaines dans le Tell Oranais...	83
Figure 41 : Carte de répartition de l'érosivité en Été selon Deffontaines dans le Tell Oranais.....	83
Figure 42 : Echelle de salure en fonction de la conductivité de l'extrait aqueux au 1/5.....	86
Figure 43 : Triangles de classification de nos échantillons du point de vue de la texture et de la sensibilité à la battance	88
Figure 44 : Triangles texturales renseignés en classe de stabilité structurale et d'aptitude à la fissuration d'après Monnier et Stengel (1982).....	89
Figure 45 : Position de nos échantillons dans l'Abaque de Casagrande.....	92

Figure 46 : Essai de cisaillement rectiligne de sols bruns vertiques sur marnes.....	93
Figure 47-a : Répartition des ensembles variables explicatives suivant l'axe 1 et 2.....	95
Figure 47-b : Répartition des ensembles des variables explicatives suivant l'axe 1 et 3.....	96
Figure 48 : Répartition des ensembles échantillons suivant l'axe 1 et 2.....	96
Figure 49 : Carte du facteur d'érosivité de pluies R.....	99
Figure 50 : Carte du facteur d'érodibilité k.....	100
Figure 51 : Carte du facteur topographique LS.....	101
Figure 52 : Carte d'occupation du sol.....	103
Figure 53 : Carte des pratiques antiérosives.....	104
Figure 54 : Carte des pertes en sol (E).....	105
Figure 55 : Etude comparative de coût des différents types de seuil.....	111
Figure 56 : La disposition des billons sur les versants en fonction de la pente (Roose, 1994).....	112

Liste des tableaux

Tableau 1 : Principales caractéristiques des différents mécanismes de désagrégation	08
Tableau 2 : Classe d'interprétation de la perméabilité.....	16
Tableau 3 : Grille d'interprétation de facteur d'érodibilité (K).	17
Tableau 4 : La stabilité structurale des sols selon les valeurs d'Is (Monnier et Stengel, 1982).....	19
Tableau 5 : Exemple d'interaction : texture-matière organique sur la stabilité structurale	20
Tableau 6 : classification des sols selon l'indice de plasticité	24
Tableau 7 : Indice de plasticité selon la texture des sols.....	24
Tableau 8 : Transport des sédiments de quelques Oueds dans le Tell oranais.....	31
Tableau 9 : Pluviométrie moyenne mensuelle des stations du Tell oranais (mm).....	43
Tableau 10 : Pluviométrie moyennes saisonnière.....	43
Tableau 11 : Fréquence en (%) des classes de hauteurs de pluies dans les stations du Tell oranais.....	45
Tableau 12 : Moyenne de températures du mois le plus chaud « M », du mois le plus froid « m », Quotients pluviothermiques d'Emberger (Q2) et de Stewart (Q3) du Tell oranais.....	46
Tableau 13 : Humidité relative minimale, maximale et moyenne exprimé en % des stations du Tell oranais.....	46
Tableau 14 : Coordonnées géographiques des 21 stations du Tell oranais.....	53
Tableau 15 : Localisation géographique des échantillons élevés dans deux zones test.....	55
Tableau 16 : Valeurs de l'Indice de Fournier, d'Arnoldus et de Rango-Arnoldus.....	75
Tableau 17 : Échelle conceptuelle pour l'évaluation de l'indice de Fournier selon (Oduro-Afriyie, 1996).....	76
Tableau 18 : Classes de MFI (CEC, 1992).....	76
Tableau 19 : Résultats d'analytique granulométrique des échantillons.....	85
Tableau 20 : Résultats d'analyse chimique et physique et le comportement des échantillons.....	87
Tableau 21 : Résultats d'analyse physique et le comportement des échantillons.....	87
Tableau 22 : Résultats d'analyse minéralogique des échantillons.....	90
Tableau 23 : Résultats d'analyse mécanique des échantillons.....	93
Tableau 24 : Pourcentage d'inertie extrait par les trois premiers facteurs (valeurs propres).....	94
Tableau 25 : Répartition des classes du facteur d'érosivité R dans la partie occidentale du bassin versant de l'Oued Mina.....	100
Tableau 26 : Répartition des classes du facteur d'érodibilité K dans la partie occidentale du bassin versant de l'Oued Mina.....	101
Tableau 27 : Répartition des classes du facteur LS dans la partie occidentale du bassin versant de l'Oued Mina.....	102
Tableau 28 : Valeurs de C correspondant aux différents types d'occupation du sol dans la partie occidentale du bassin versant de l'Oued Mina.....	103

Tableau 29 : Valeurs de P correspondant aux différents types des travaux de lutte contre l'érosion dans la partie occidentale du bassin versant de l'Oued Mina.....	104
Tableau 30 : Classes de pertes en terre (t/ha/an) dans la partie occidentale du bassin versant de l'Oued Mina.....	106
Tableau 31 : Efficacité de trois types de seuils sur le ravinement (Roose, 1994).....	110

Liste des photos

Photo 1 : Appareillage de cisaillement des échantillons des sols.....	26
Photo 2 : Reboisement en banquettes.....	104
Photo 3 : Travaux en bandes alternées.....	104
Photo 4 : Différents types de seuils utilisés pour la fixation mécanique de la ravine.....	109
Photo 5 : Ouverture des potets pour la fixation biologique du versant.....	111
Photo 6 : Fixation biologique en amont à base d' <i>Opuntia ficus-indica</i> , d' <i>Agave americana</i> et <i>Ampelodesma mauritanicum</i>	113
Photo 7 : Plantation d' <i>Opuntia ficus-indica</i> et <i>Pinushalepensis</i> selon les courbes de niveau sur versant.....	113
Photo 8 : Renforcement des seuils par de l'Eucalyptus.....	114
Photo 9 : Installation de la végétation spontanée dans les atterrissements.....	114
Photo 10 : Incision des parois de la ravine des marnes vert-clairs.....	122
Photo 11 : Erosion régressive de la ravine.....	122

Liste des annexes

Figures

Figure A : Diagramme Ombrothermique de quelques stations du Tell oranais.....	130
Figure B : Quelques types de marnes dans les deux zones test.....	131
Figure C : Rapport d'essai de limites d'Atterberg de marnes vert-clair.....	132
Figure D : Téléchargement des images satellites par le biais de site earthexplorer USGS.....	133
Figure E : Image satellite 197-35 de l'est du Tell oranais.....	133
Figure F : Vue globale de la partie occidentale du bassin versant d'Oued Mina.....	133
Figure G : Diagramme DRX des Minéraux argileux dans les marnes vert-clair.....	134

Tableaux

Tableau A : Description des échantillons dans les deux zones test.....	128
Tableau B : Valeurs du facteur d'érosivité des pluies R des stations météorologiques de la partie occidentale du bassin versant d'Oued Mina.....	129

Liste des abréviations

Ech. : Echantillon	IB : Indice de Boiffin
1 : Marnes vert-clair	Cu : Cohésion
2 : Marnes bleues	SS : Stabilité structurale
3 : Marnes vert-clair jaunâtres	CSS : Classe de stabilité structurale
4 : Sols bruns vertiques sur marnes	K : Erodibilité
5 : Sols peu évolués d'apport alluvial sur marnes	P : Perméabilité
6 : Marnes grises	Mmhos : Millimhos
7 : Marnes brunes	Meq : Miliéquivalent
8 : Marnes vert-clair armées de grès	C.E.C : Capacité d'Echange Cationique
9 : Marnes bleues compactes et calcaires	Moy : Moyennement
10 : Marnes brunes armées de calcaire	Fort : Fortement
11 : Sols calcaires et marnes	USLE : Universal Soil Loss Equation
Ps : Période sèche	SIG : Système d'Information Géographique
Ph : Période humide	MNT : Modèle numérique de terrain
T : Température moyenne annuelle exprimé en (°C)	NDVI : Normalized Difference Vegetation Index
M : moyenne des maximums du mois le plus chaud (°C)	mm / ha. H. an : Millimètre/hectare.heure.an
m : moyenne des minimums du mois le plus froid (°C)	MJ. mm / ha. H. an : Mégajoule. Millimètre/hectare.heure.an
P : Pluviométrie moyenne annuelle exprimé en (mm)	t/ha/an : Tonne / hectare / an
IF : Indice de Fournier	USGS : Science for a changing World
IA : Indice d'Arnoldus	DRS : Défense et restauration des sols
IRA : Indice de Rango-Arnoldus	ORSTOM : Office de la recherche scientifique et technique outre-mer
T : Texture	INRF : Institut National de Recherche Forestière
SB : Sensibilité à la battance	INSID : Institut National des Sols, de l'Irrigation et du Drainage
RB : Risque de battance	FAO : Food and Agriculture Organization
AF : Aptitude à la fissuration	ANRH : Agence National des Ressources Hydrauliques
DP : Degré de plasticité	USTHB : Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene.
IP : Indice de plasticité	
S : Structure	

INTRODUCTION

Introduction

L'érosion des sols se développe lorsque les eaux de pluie, ne pouvant plus s'infiltrer dans le sol, ruissellent en emportant les particules de terre. Ce refus du sol d'absorber les eaux en excédant apparaît soit lorsque l'intensité des pluies est supérieure à l'infiltrabilité de la surface du sol, soit lorsque la pluie arrive sur une surface partiellement ou totalement saturée par une nappe d'eau (ruissellement par saturation). Ces deux types de ruissellement apparaissent généralement dans des milieux très différents, parfois l'on observe une combinaison des deux (Le Bissonnais et *al.*, 2002). Une fois le ruissellement déclenché sur la parcelle, l'érosion peut prendre différentes formes qui se combinent dans le temps et dans l'espace : l'érosion diffuse ou en rigoles parallèles et l'érosion linéaire ou concentrée dans le talweg.

Comme le suggèrent ces définitions, les processus érosifs dépendent d'une multiplicité de facteurs interagissant entre eux, et sont de ce fait complexes à modéliser. Les facteurs de l'érosion devant être pris en compte pour étudier les phénomènes érosifs font maintenant l'objet d'un consensus et regroupent le sol, l'occupation du sol, la topographie et le climat. Il a été montré que le facteur R (agressivité des pluies) est hautement lié aux pertes de sol (Wischmeier et Smith, 1978). Les gouttes de pluie sont un des facteurs principaux qui peuvent briser les agrégats et disperser les particules de sol. Cette dispersion se produit à la surface du sol, lorsque la force de cisaillement du ruissellement devient supérieure à la résistance au détachement du sol.

Dans les régions méditerranéennes, la dégradation des sols s'exprime par une diminution du couvert végétal, une perte de la productivité de sol, une perte de la matière organique et la capacité de rétention.

Le Tell oranais à climat méditerranéen semi-aride, est particulièrement affecté par l'érosion hydrique. Ceci est dû à de longues périodes sèches suivies d'orages avec de violentes chutes de pluies érosives, tombant sur des pentes raides aux sols fragiles où une grande partie des terrains est constituée essentiellement des marnes (Benchetrit, 1972). Les pratiques culturales inappropriées, la déforestation, le surpâturage et les activités anthropiques néfastes sont autant de causes qui accentuent l'érosion des sols dans cette région. L'effet de ces pluies accentue la fragilité d'un milieu déjà malmené par une pression démographique croissante et une forte charge animale. Ceci a pour conséquence, la dégradation accélérée des sols avec l'apparition et l'extension des différentes formes d'érosion hydrique provoquant des forts débits de pointe, chassant une grande quantité de sédiments dans les oueds et les retenues (Roose et *al.*, 2000).

La compréhension de l'évolution des modes d'utilisation des sols et du couvert végétal est une préoccupation majeure en Algérie. En effet, les dynamiques d'occupation des sols ont des implications directes sur la disponibilité des ressources naturelles (Bachir Boudjra et *al.*, 2011).

Face au problème de l'érosion en Algérie, des travaux de défense et restauration des sols ont été réalisés depuis les années 1940 sur tout le territoire national. Les techniques appliquées étaient largement inspirées des travaux de conservation des sols lancés aux Etats-Unis d'Amérique dans les années 1930. Ces travaux se sont heurtés à l'opposition des populations locales qui considèrent que le réseau de banquettes va "ronger" initialement une partie de leurs terres. En 1985, l'Institut National de la Recherche Forestière en collaboration avec l'ORSTOM ont développé une nouvelle stratégie, il s'agit de la gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols. Cette stratégie place sa priorité dans l'amélioration de la production de la biomasse des terres cultivées par l'augmentation de la fertilité et par l'amélioration de l'infiltration, d'où la réduction des risques érosifs.

Selon Roose *et al.* (2012), l'érosion et la dégradation des sols au Maghreb font l'objet de nombreuses études, qui révèlent la rapidité et la gravité de cette évolution du fait des conditions climatiques défavorables marquées par des contrastes dans les saisons avec des pluies torrentielles. L'arrachement des sédiments par le ravinement dans les bassins versant des régions semi arides est la cause principale de la sédimentation des retenues collinaires. Ce phénomène est très actif sur des sols formés par des affleurements de marnes et d'argilites en de nombreux pays autour de la Méditerranée (Poesen et Hooke, 1997). Des pondérations calculées à partir de régions présentant des climats analogues et des cultures voisines (Tunisie, Algérie et Maroc) montrent des quantités importantes des pertes en terre annuelles (Collinet et Zante, 2005). L'envasement pose des problèmes de quantité et de qualité des eaux des barrages. En matière de quantité, l'infrastructure hydrotechnique algérienne forte de 74 grands barrages, d'une capacité de 8 milliards de m³ est amputée annuellement d'une capacité de plus de 50 millions de m³. A titre d'exemple, le barrage de Sidi M'Hamed Ben Aouda (Relizane) a reçu un volume de vase égal à 6,7 millions de m³ par année durant la période 1995-2003 (Remini et Bensafia, 2016).

Plusieurs travaux ont été réalisés pour étudier le phénomène érosif dans le Nord-Ouest Algérien, on cite ceux de Greco (1966), de Benchetrit (1972), de Kouri (1993), de Touaibia *et al.* (2000), de Roose *et al.* (2012) et de Toumi *et al.* (2013). Meddi (2013 et 2015), a montré l'impact de l'érosivité des pluies sur la variabilité spatiale et temporelle de l'érosion des bassins versants dans le centre et l'Ouest Algérien, en intégrant le climat, la végétation, la topographie, le type de sols et de l'impact négatif des activités humaines. Meddi *et al.* (2014), mentionnent que les plaines Nord-Ouest et le centre du pays ont été particulièrement touchés par la sécheresse. Il en résulte une diminution significative des rendements et des ressources en eau avec de graves dommages aux cultures, par l'utilisation de l'indice de sécheresse de Palmer et l'indice standardisé de précipitation pour évaluer la gravité de la sécheresse. Mazour (2004) et Roose *et al.* (2000) ont mesuré dans les

montagnes méditerranéennes du Tell occidental des pertes en terre par érosion en nappe variant de 0,1 à 20 t/ha/an, alors que l'ablation par ravinement est de l'ordre de 90 à 300 t/ha/an. En conséquence, environ 6 millions d'hectares sont exposés aujourd'hui à une érosion active ; en moyenne 120 millions de tonnes de sédiments sont emportés annuellement par les eaux vers la mer (Heddadj, 1997). Protéger les retenues collinaires localisées dans ces zones marneuses de l'Ouest Algérien qui s'ensavent à un rythme rapide, est un objectif économique essentiel (Kouri et Gomer, 2010). De ce fait, connaître les principaux facteurs de ce phénomène s'impose pour mettre en place des mesures préventives afin de protéger les sols contre l'érosion hydrique dans l'Ouest algérien (Ramdani, 1993).

L'utilisation des données satellitaires et les SIG pour la gestion et l'analyse de ces données deviennent des outils incontournables pour le suivi du processus érosif qui impose une connaissance périodique de l'occupation du sol et l'aménagement du territoire en raison de la périodicité des prises de vue et de résolutions spatiales de plus en plus performantes. D'après Roose et *al.* (2012), la télédétection et les GIS sont des techniques modernes où les pertes en terre à chaque niveau doivent être quantifiées. En Algérie selon Roose et *al.* (2000) les pertes en terre par le ravinement varient de 90 à 300 t/ha/an, en fonction de la lithologie, de la pente, des pluies, de l'humidité du sol et de la distance au réseau de drainage. On trouve un grand nombre de techniques qui permettent de prévenir cette érosion au niveau du bassin versant. Elles relèvent de l'aménagement du sol, soit par des techniques mixtes (mécaniques et biologiques), soit par des techniques de préparation du sol et de la conduite des cultures. Les scénarios d'évolution futurs, permettent d'envisager les risques à venir pour la protection des sols et d'augmenter la production agricole.

Le travail comprend quatre aspects qui porteront sur : la cartographie du risque d'érosivité des pluies du Tell oranais en utilisant le logiciel Surfer, la connaissance des indicateurs d'érodibilité des sols, l'évaluation du risque d'érosion du sol par une approche Télédétection/SIG/USLE à l'échelle de la partie occidentale du bassin versant de l'Oued Mina et enfin la proposition des techniques d'aménagement pour les zones sensibles à l'érosion hydrique. A cet effet, notre étude s'organise en cinq chapitres :

- Le premier chapitre présentera les causes et les conséquences des processus d'érosion hydrique. Une recherche bibliographique permettra de préciser les définitions les différents phénomènes de l'agressivité climatique, le risque érosif et présenter les bases théoriques qui déterminent les indicateurs de l'érodibilité des sols.
- Dans le second chapitre sont présentées les caractéristiques géologiques, géographiques, hydrographiques, des formations superficielles des sols et du couvert végétal de la région d'étude.

- Dans le troisième chapitre sera abordé le climat général de la région d'étude, l'étude des pluies et les caractéristiques générales du climat dans le Tell oranais. Une analyse particulière sera consacrée à l'agressivité climatique dans la région.
- Dans le quatrième et cinquième chapitre, nous exposerons la méthodologie suivie, les résultats avec des propositions de techniques antiérosives à l'échelle d'un bassin versant, ainsi que la discussion des résultats en comparaison avec ceux obtenus à l'échelle maghrébine et internationale.

CHAPITRE I
APERCU BIBLIOGRAPHIQUE

1- Définition de l'érosion

Selon Soutter et *al.* (2007) « Le terme érosion englobe toutes les formes d'usure affectant la couche superficielle de l'écorce terrestre. Celles-ci se distinguent habituellement selon la nature de l'agent en cause : érosion hydrique, éolienne, glaciaire, fluviale, marine.

Le processus d'érosion se caractérise en général par trois phases : une phase de détachement ou d'ablation, suivie d'une phase de transport et d'une phase de déposition ou de sédimentation »

La dégradation des sols entraîne la diminution de la capacité de production du sol. Certes l'érosion et la dégradation des sols sont deux processus qui sont couplés, mais la dégradation du sol a un sens plus large : elle inclut la pollution, la salinisation, l'épuisement des nutriments du sol. La dégradation des sols est souvent une étape avant que l'érosion ne s'installe de façon évidente, car il n'est pas nécessaire que le sol soit enlevé pour que sa production baisse (Topper et *al.*, 1985).

La pluie est le facteur causal de l'érosion hydrique, l'ampleur du phénomène érosif varie selon l'intensité, la hauteur et la fréquence des pluies. Dans le Tell oranais, les pluies torrentielles ($P \geq 20$ mm/24h) sont irrégulières aussi bien dans l'espace que dans le temps et engendrant des crues fortes, rapides et chargées. Ces averses de fortes intensités sont fréquentes en automne (Arabi et Roose, 1989) au moment où la couverture végétale est absente. Les conséquences de ces fortes intensités des pluies, déclenchent les phénomènes de transport et dépôt des sédiments détachés, soit sous l'impact des gouttes de pluie, soit par le ruissellement qui exerce une contrainte de cisaillement. Cette érosion qui pose par la suite de graves problèmes socio-économiques, réduction de la surface agricole et envasement des barrages.

Dans l'Ouest algérien, l'érosion hydrique fragilise l'écosystème conjointement par les épisodes de sécheresse et par l'activité anthropique. Les conséquences sont désastreuses pour les milieux en raison des nuisances qui lui sont associées.

L'érosion des sols par la pluie et le ruissellement est un phénomène largement répandu dans les différents pays méditerranéens (Bou Kheir et *al.* 2001). Elle continue à prendre des proportions considérables, en particulier sur les pentes, à cause de la nature torrentielle des pluies, de la forte vulnérabilité des terrains et de l'impact défavorable des activités humaines (déforestation, incendies, mauvaise conduite des travaux agricoles, etc.).

1.1- Etude de l'érosivité de pluies

L'érosivité est un indicateur de l'agressivité climatique. Au cours d'un événement pluvieux, l'énergie cinétique ainsi que la quantité de mouvement dissipée lors de l'impact de gouttes, permettent le détachement des particules et leur déplacement par rejaillissement.

Bien que l'érosion hydrique soit tributaire de plusieurs facteurs, nul n'ignore le grand rôle de l'agressivité climatique dans le déclenchement du phénomène de l'érosion et du ruissellement. Les

pluies par l'intermédiaire de leurs caractéristiques : hauteur, intensité et énergie cinétique des gouttes, présentent une certaine capacité érosive qui peut être évaluée.

L'action érosive de l'eau sur le sol se déroule en deux étapes distinctes :

- l'une consiste à détacher les particules de sol, par l'attaque des gouttes de pluie (effet splash) ;
- l'autre consiste à les transporter, c'est le ruissellement. La pluie tombant sur un sol produit un transport solide précédé d'un ruissellement qui dépend de l'énergie et de l'intensité de la pluie (Boiffin, 1984).

Plusieurs paramètres interviennent dans l'action érosive des pluies, parmi lesquels on cite l'intensité, la hauteur, l'énergie cinétique, la taille et la vitesse des gouttes de pluie, la durée et la fréquence des pluies.

1.1.1- Intensité de pluies

Wischmeier et Smith (1962) ont constaté que les fortes intensités provoquent une forte perte en terre. Ceci a été aussi constaté avec de faibles intensités mais d'une durée assez longue sur des sols instables et nus. Ces fortes intensités entraînent la conjonction des phénomènes d'engorgement et de battance qui aboutissent à la formation de croute ou pellicules très peu perméables. Le ruissellement dépend essentiellement de la lame précipitée, de son intensité, de l'humidité préalable du sol et de l'état de surface.

L'énergie cinétique est égale au demi-produit de sa masse par le carré de sa vitesse :

$$E_c = \frac{1}{2} M V^2$$

E_c : énergie cinétique en joule (M est en kg et V en m/s).

M : masse de la goutte

V : vitesse de chute

L'énergie des gouttes déclenche le processus de destruction des agrégats du sol (figure 1) sur les versants de pente faible à moyenne, tandis que le ruissellement assure le transport des particules détachées.

Les problèmes posés par le ruissellement et l'érosion sont nombreux et variés. Selon Roose (1984), trois hypothèses sont posées quant au ruissellement et à son origine :

- le ruissellement se développe lorsque l'intensité de la pluie dépasse la capacité d'infiltration de la surface du sol, c'est-à-dire lorsque l'état de la surface du sol se dégrade.
- le ruissellement ne se déclenche que par saturation de l'horizon supérieur
- le ruissellement dépend de la contribution d'une partie du bassin.

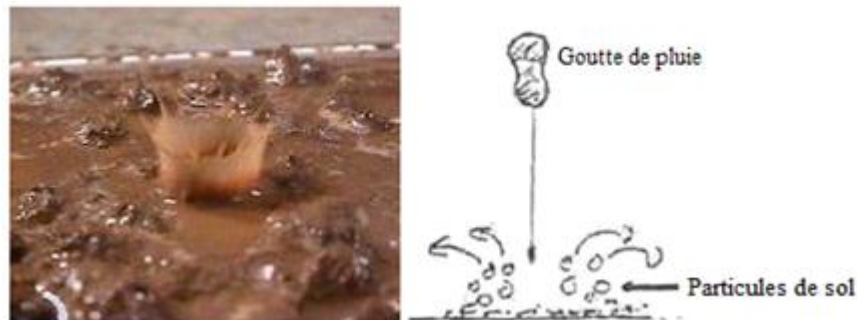


Figure 1 : Effet d'une goutte de pluie (effet splash)

Le rejaillissement peut projeter les particules du sol jusqu'à 0,60 m verticalement et 1,5 m horizontalement et la masse de sol détachée.

D_p , peut être quantifiée expérimentalement, par la relation (Poesen, 1984) :

$$D_p = a \cdot E_c^b$$

Où D_p est la masse détachée et E_c l'énergie cinétique de la pluie. Les coefficients a et b dépendent essentiellement de la texture et de la structure du sol.

L'érosion par rejaillissement conduit à la fermeture de la surface du sol et la réduction de son infiltrabilité en formant une croûte de battance d'une épaisseur de un à deux centimètres ; la rugosité de la surface du sol disparaît, elle devient lisse et perd sa perméabilité, il y a donc ruissellement.

1.1.2- Hauteur et intensité de pluie

On mesure la quantité des pluies tombées durant un certain laps de temps, exprimé généralement en mm pour la hauteur ou mm/h pour l'intensité. Les principaux instruments de mesures des précipitations sont le pluviomètre et le pluviographe. Selon Roose (1984), La hauteur de pluie peut être un bon indicateur de l'érosivité des événements pluvieux.

1.1.3- Durée des pluies

La durée de la pluie a une influence sur le taux de saturation de l'horizon superficiel du sol. Les pluies durables provoquent la saturation du sol en eau, l'infiltration diminue et il y a donc ruissellement à la surface. Laouina (1998), note que ce sont les périodes pluvieuses durables avec des évènements de forte intensité répétitifs qui occasionnent la dégradation la plus forte, avec le passage du ruissellement aréolaire au ruissellement en griffes et en rigoles. Les pluies intenses et brèves, ne permettent qu'une dégradation modérée.

1.1.4- Fréquence des pluies

Elle caractérise la répartition d'une pluie dans le temps. La fréquence $f = 1/T$, dont T est le nombre d'années de la période de retour. Elle est utilisée dans l'établissement des courbes Intensité-durée- Fréquence qui matérialisent la notion de risque climatique, utilisée dans différentes spécialités (hydrologie, génie rural)

Les averses sont plus dangereuses quand elles se suivent à intervalles rapprochés ; le sol est saturé par la première pluie, l'eau n'a pas le temps de s'évaporer ou de s'infiltrer et lorsque tombe l'averse suivante, elle ruisselle entièrement et provoque presque toujours une érosion importante. Les risques d'apparition du ruissellement peuvent être variables pour un même sol en fonction de son état hydrique initial. La sensibilité d'un sol à l'érosion n'est pas un caractère permanent. Elle dépend de l'interaction entre le climat, l'état initial et la nature du sol.

1.2- Différentes formes de manifestation de la désagrégation

La désagrégation par l'eau résulte des différents mécanismes physico-chimiques et peut affecter différents niveaux de la structure depuis les interactions entre les particules d'argiles jusqu'aux mottes de terre (Le Bissonais et Le Souder, 1995).

Les travaux de Boiffin (1984 et 1985), sur l'étude expérimentale du comportement des sols argileux s'attaquaient à l'analyse du processus de changement morphologique et de la dégradation des couches superficielles des sols dans les conditions du climat naturel. Il a montré que la première phase peut être variable avec le temps. La surface du sol commence par être motteuse, et graduellement couverte par une croûte structurale compacte et épaisse de quelques mm qui réduit sa perméabilité. La deuxième phase est la formation d'une croûte à partir de dépôt (croûte de sédimentation). Mais avant d'être arrachées sous l'effet des gouttes de pluie ou de ruissellement, les particules terreuses doivent être mobilisées et certains mécanismes doivent, au préalable, provoquer leur disjonction. De nombreux travaux ont montré que c'est au cours de l'humectation des agrégats qu'intervient cette phase initiale de désagrégation. Le Bissonais (1988) a montré que quatre principaux mécanismes (tableau 1) concourent à la destruction des agrégats : L'éclatement total, c'est à dire la désagrégation par compression de l'air piégé lors de l'humectation, la désagrégation mécanique sans éclatement à l'état saturé sous l'impact des gouttes de pluies, la micro-fissuration par gonflement différentiel, et la dispersion physico-chimique.

Tableau 1 : Principales caractéristiques des différents mécanismes de désagrégation

Mécanismes	Eclatement	Désagrégation mécanique	Désagrégation par gonflement différentiel	Dispersion physico-chimique
Nature des forces en jeu	Pression interne de l'air piégé lors de l'humectation	Impact des gouttes de pluie	Pression interne par gonflement différentiel de l'argile	Réduction des forces d'attraction entre les particules
Intensité de la désagrégation	Totale	Cumulative	Partielle	Totale
Propriétés du sol en jeu	Porosité, mouillabilité, cohésion interne	Cohésion humide (argile, M.O, oxydes)	Gonflement potentiel, cohésion d'humectation	Statut ionique, minéralogique de l'argile
Particules résultantes	Petits micro agrégats (<500µm)	Particules élémentaires et micro-agrégats	Macro et micro agrégats	Particules élémentaires

Source : Le Bissonais et Le Souder (1995)

1.2.1- Désagrégation mécanique

La désagrégation est un aboutissement obligatoire du déséquilibre qui s'établit lors de l'affaiblissement des forces de liaison par rapport à une augmentation des forces de rupture dues au piégeage de l'air au sein de l'agrégat au cours de l'humectation (Le Bissonnais, 1988). Cette désagrégation se produit soit seule, si les agrégats sont initialement saturés, soit en complément des autres mécanismes.

Les mécanismes majeurs de dégradation de la surface impliquent le choc des gouttes de pluies sur la surface du sol. L'éclatement et la micro-fissuration sont essentiellement liés au volume d'eau mis en contact avec l'agrégat et à la vitesse d'apport de cette eau, alors que l'usure mécanique dépend plus fortement des caractéristiques énergétiques des gouttes.

Il s'agit d'une sorte d'abrasion de la périphérie des agrégats sous l'action de l'impact des gouttes qui n'entraînent donc pas de rupture de l'agrégat lui-même mais plutôt des micro-ruptures individualisant des particules de taille $< 100 \mu\text{m}$ situées à la surface de l'agrégat. Dans le cas des agrégats initialement secs, l'évolution est beaucoup plus lente et progressive (Le Bissonnais, 1988).

On note également que la désagrégation augmente avec l'agressivité pour les agrégats saturés, alors qu'elle reste voisine d'une même valeur pour les agrégats initialement secs.

1.2.2- Processus d'éclatement

Lorsqu'un agrégat sec se trouve en présence d'une phase liquide (humectation brutale et totale), la succion capillaire attire avec force la phase liquide vers son centre. La pression de l'air ainsi emprisonné provoque l'éclatement de l'agrégat dès qu'elle excède sa résistance mécanique. Cette désagrégation a lieu lorsque la pression de l'air dépasse la résistance mécanique des assemblages des particules. Des études détaillées et des expériences au laboratoire ont montré l'importance du mécanisme d'éclatement vis à vis de la dégradation structurale superficielle (Henin, 1938).

1.2.3- Micro-fissuration

Les phénomènes d'éclatement des agrégats et le choc des gouttes d'eau sur la surface sont largement responsables de la dégradation structurale superficielle.

Boiffin (1984) a observé que lors d'alternances hydriques (humectation-dessiccation), les agrégats de surface se fragmentent sur leur périphérie et entraînent l'individualisation des micro-agrégats. Les risques de fissuration des agrégats sont liés au nombre et à l'amplitude des alternances hydriques, ainsi qu'à la cinétique de réhumectation (Le Bissonnais, 1988).

La teneur en argile augmente les risques de fissuration, à cause de l'augmentation du gonflement potentiel lors de l'humectation même brutale.

Les agrégats riches en argile gonflante (plus de 50%), subissent une fissuration. Le mécanisme qui se manifeste même sous vide à la différence des sols limoneux, ne peut pas être imputé au piégeage de l'air mais au gonflement des matériaux (Monnier, 1965). Or celui-ci ne concerne pas simultanément l'ensemble de l'agrégat. Cette hétérogénéité du gonflement entraîne des tensions susceptibles de provoquer localement la rupture des liaisons entre particules et donne des fissures.

1.2.4- Dispersion

L'humectation réduit les forces de liaison des particules. Les actions mécaniques exercées sur les particules argileuses provoquent la rupture de leurs forces de liaison qui s'atténuent sous l'effet du gonflement. Dans un agrégat de sols sableux, ce mécanisme peut aller jusqu'à l'effondrement complet de sa structure. Il s'agit alors d'une dispersion grossière pour les sols argileux, surtout s'ils sont riches en sodium. L'humectation entraîne fréquemment une forme analogue de désagrégation. L'agrégat en se délitant, cède de l'argile (dispersion argileuse), (Casenave et Valentin, 1989).

Cette argile mobilisée peut très facilement migrer dans l'eau d'infiltration couvrant la périphérie des agrégats ou se déposer sur la surface du sol pour former la croûte de surface. Cette boue devient assez fluide pour s'écouler vers le bas et contribuer ainsi au colmatage des interstices entre agrégats (Le Bissonnais and Singer, 1992).

1.3- Mécanisme de l'érosion hydrique

L'action érosive de l'eau sur le sol se déroule en trois phases distinctes :

1.3.1- Détachement des particules de sol

Lorsque l'intensité devient plus grande, il y a destruction de la structure sous l'effet des gouttes de pluies qui provoquent un rebondissement de la terre lors de l'impact avec le substrat (effet splash). Cette phase s'accompagne d'un colmatage de la porosité entraînant la formation d'une pellicule de battance en surface, cette dernière est la principale cause de la diminution de l'infiltrabilité de la surface du sol et l'augmentation des risques de ruissellement et d'érosion.

1.3.2- Ruissellement

Le ruissellement consiste à transporter les particules de sol en son sein et dans sa propre direction, c'est l'écoulement de l'eau gravité à la surface du sol, suivant la pente du terrain. C'est aussi l'écoulement dans les micro-réseaux hydrographiques, des eaux météoriques qui ont échappé à l'infiltration, à l'évaporation et au stockage superficiel. Le ruissellement apparaît dès que l'intensité d'une pluie devient supérieure à la vitesse d'infiltration du sol. Il commence généralement selon Chebbani et *al.* (1999) après 22 mm de pluie si le sol est sec ou après 4 mm si le sol est humide, encroûté ou compact.

Les risques d'apparition du ruissellement peuvent être variables pour un même sol en fonction de son état hydrique initial. La sensibilité d'un sol à l'érosion n'est pas un caractère permanent. Elle

dépend de l'interaction entre le climat, l'état initial et la nature du sol. Le ruissellement peut être diffus "en nappe", entraînant les particules fines détachées des agrégats, alors que les particules grossières restent sur place ou concentré "ruissellement en griffes et rigoles" dans les zones à circulation préférentielle de l'eau liées au micro-relief.

Chebbani *et al.* (1999), notent que le ruissellement peut être à l'origine d'une érosion spectaculaire qui se traduit par le creusement de chenaux, de forme et de tailles diverses et s'accompagne de la mise en place de dépôts d'étendue et d'épaisseur très variables. Le taux de ruissellement sur une parcelle est donné par le rapport entre la lame d'eau ruisselée et la lame d'eau précipitée, ce taux peut être mesuré en moyenne sur l'année (k_{ram}) ou après une averse exceptionnelle donnée, là il s'agit d'un coefficient de ruissellement maximum (k_{rmax}). Il est bien évident que l'énergie du ruissellement est inférieure à celle de la pluie sur pentes modérées ; mais lorsque la déclivité du site augmente, il y a diminution de la rugosité de la surface et le ruissellement acquiert une force abrasive qui lui confère une énergie excédant celle des précipitations. Le ruissellement serait dans ce cas, la cause principale de l'érosion. Lorsque la longueur de la pente ne permet pas au ruissellement de prendre de la vitesse, celui-ci reste diffus avec un potentiel d'arrachement et de transport très limité : il s'agit d'érosion en nappe. Si par contre la longueur de la pente est suffisante pour donner de la vitesse au ruissellement, celui-ci acquiert un pouvoir considérable d'arrachement et de transport lui permettant d'inciser le sol : il s'agit d'érosion linéaire.

1.3.3- Sédimentation

La sédimentation se produit lorsque le courant n'est plus capable de maintenir les particules en suspension et résulte d'un ralentissement de la vitesse d'écoulement dont les causes peuvent être multiples : La terre déplacée par érosion diffuse ou concentrée peut se déposer à la faveur d'un obstacle, d'un changement d'état de surface ou de végétation, ou encore d'une diminution de la pente qui réduit la compétence du ruissellement (figure 2).

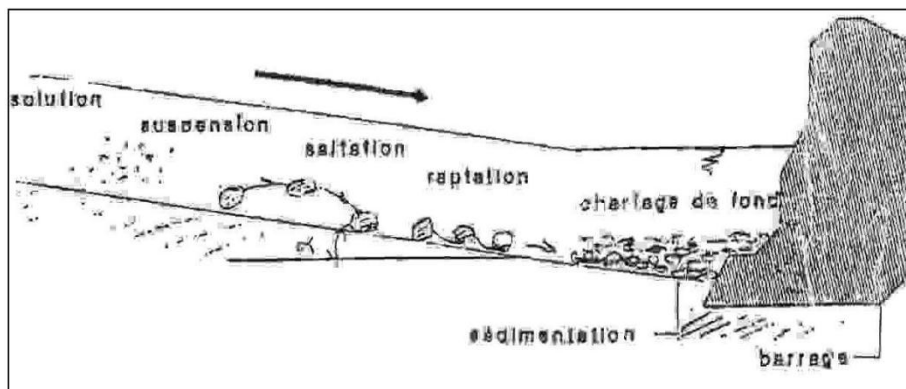


Figure 2 : Mécanismes de l'érosion hydrique (Roose, 1994).

1.4- Formes d'érosion

1.4.1- Erosion en nappe

Elle caractérise les surfaces relativement planes où la pente est uniforme (Topper et *al.*, 1985). C'est une forme d'érosion très difficile à déceler sur le terrain, méritant par-là les qualificatifs de dangereuse, pernicieuse et imperceptible. Les seuls signes visibles annonciateurs d'une érosion en nappe, sont des changements de couleurs qui affectent la surface du sol. Ce sont des teintes de plus en plus claires observables sur sol nu fraîchement labouré.

L'érosion en nappe attaque principalement les horizons superficiels, en général les plus riches non seulement en éléments nutritifs mais aussi en matières organiques. Ce qui entraîne un appauvrissement de ces couches en substances fertilisantes et en particules fines, la conséquence est une topographie constituée uniquement de cailloutis.

1.4.2-Erosion linéaire

L'érosion linéaire apparaît lorsque le ruissellement en nappe s'organise, l'eau se concentre d'abord dans les surfaces déprimées du terrain, empruntant des lignes de moindre résistance pour descendre le long des pentes. L'écoulement superficiel chemine dans de petites rigoles ou filets qui entaillent le sol en profondeur. Les particules fines libérées sous l'effet des gouttes de pluies ou par le cheminement de l'eau dans les rigoles, sont transportées par le ruissellement. Dans les endroits où l'eau se collecte, son action érosive est plus intense ; elle va creuser et élargir les rigoles et progressivement va entailler le sous-sol et former des ravines de plusieurs mètres de profondeur.

L'érosion linéaire par énergie du ruissellement apparaît sous diverses formes : rigoles, ravines ; ravins et badlands ou ravinement généralisé.

1.4.2.1- Erosion en rigoles

C'est une érosion débutante qui se manifeste par des incisions (rigoles) élémentaires, temporaires, le plus souvent non hiérarchisées qui apparaissent durant une averse à la suite d'une concentration locale de l'eau, canalisée par le micro-modèle préexistant, des arbustes ou les touffes de végétation ou les façons culturales (labour ou billons dans le sens de la pente).

Les rigoles peuvent être effacées par les techniques culturales ; mais lorsqu'aucun frein n'a été mis pour stopper leur progression ; elles évolueront en ravins, dans ce cas les pratiques aratoires sont inefficaces. Seuls des moyens lourds techniquement et financièrement peuvent y remédier.

1.4.2.2- Erosion en ravines

Tout comme les rigoles, les ravines sont des dépressions où se concentrent des filets d'eau, elles sont en général de dimensions supérieures (Profondeur ≥ 50 cm). L'entaille peut atteindre 2 m de profondeur, la largeur varie entre 5 et 10 m avec parfois formation de mini thalweg de 1 à 2 m environ. Ces cicatrices laissées sur le sol se rencontrent dans les régions du globe où les

précipitations se manifestent sous forme d'averses violentes et brèves. L'ampleur est portée à son maximum si les formations rocheuses sont imperméables.

1.4.2.3-Erosion en ravins

Le plus souvent, l'érosion en ravins apparaît lorsque les précédents s'exaspèrent et que les entailles s'approfondissent considérablement par érosion régressive (du bas vers le haut de la pente). Mais il n'est pas rare de voir les ravins s'installer de prime. Les dimensions d'un ravin peuvent être impressionnantes : La profondeur généralement excède les 10 m, la largeur entre 10 et 20 m et la longueur, au-delà des 200 m.

1.4.2.4-Ravinement généralisé ou badlands

C'est un réseau de ravins et ravines reliés les unes aux autres par des crêtes, aux versants généralement dénudés provoquant un affleurement de la roche mère. C'est le stade irréversible de l'érosion. Cet aspect de l'érosion hydrique peut transformer le paysage « en badlands » c'est-à-dire des terres inaccessibles à toutes formes d'exploitation.

1.4.2.5-Formes de ravins

Il est bien vrai que les ravins peuvent avoir des origines assez variées, mais tous nécessitent une concentration en eau, une alimentation forte pendant une durée assez longue et une organisation du sol qui ne présente pas d'horizons de blocage pour creuser le sol.

Cinq types de ravins ont été observés en relation avec leur fonctionnement et la cohésion du manteau pédologique ou lithologique dans le Nord-Ouest du Tell oranais et en particulier dans les monts de Beni-chougrane (Roose et *al.*, 2000).

1.4.2.5.1-Ravines en «V»

Elles forment sur des substrats homogènes et tendres comme les vertisols, les argilites, les marnes et les schistes (figure 3).

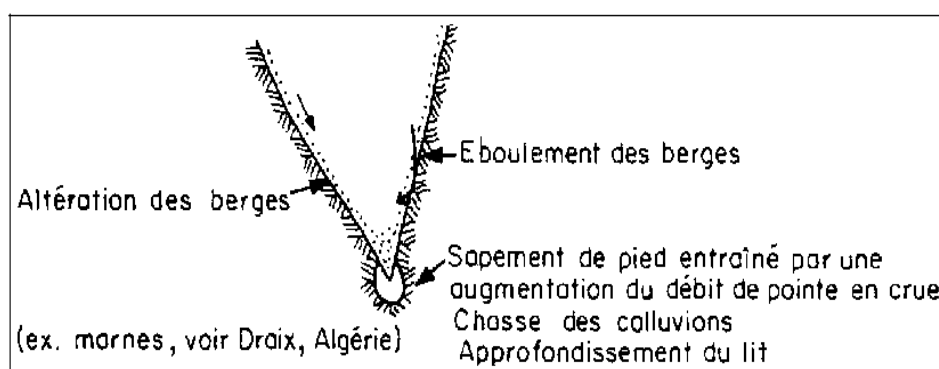


Figure 3 : Flancs de ravine en «V» sur matériaux homogènes (Roose et *al.*, 2000)

1.4.2.5.2- Ravines en «U»

Elles forment sur des sols hétérogènes comme des sols à croûtes calcaires (figure 4).

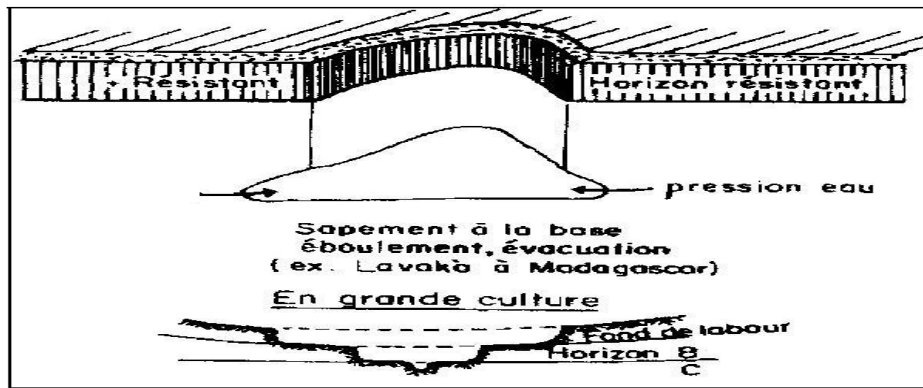


Figure 4 : Ravine en «U» sur matériau hétérogène (Roose et *al.*, 2000)

1.4.2.5.3- Ravines en «tunnel»

Elles sont fréquentes sur les sols à argiles gonflantes et les marnes contenant des sels solubles comme les gypses (figure 5).

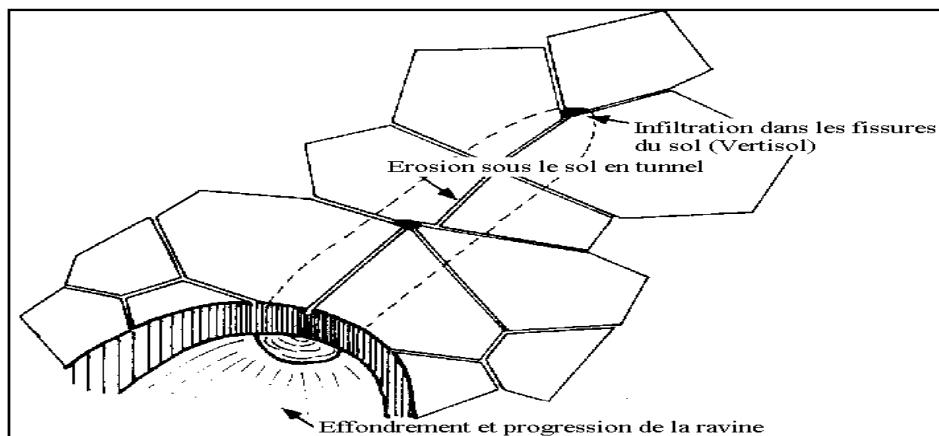


Figure 5 : Ravine en tunnel sur argile gonflante, gypses et matière solubles (Roose et *al.*, 2000)

1.4.2.5.4- Les glissements de terrain

Ce phénomène se produit lorsqu'un terrain dénudé en pente repose sur une couche imperméable. Il se rencontre dans les paysages à pentes convexes du Maghreb au-delà de 45 à 60% de pente (Roose et *al.*, 2000).

Les mouvements de masse dérivent de remaniements profonds qui naissent après une pluie prolongée, qui prennent ensuite de multiples aspects et se soldent par des glissements de terrains de diverses formes dévastatrices pour les habitations et les cultures. Les phénomènes de mouvement de masse sont très nombreux et difficiles à classer (Roose, 1994).

1.4.2.5.5- L'érosion régressive

L'érosion régressive désigne un phénomène d'érosion hydrique qui se propage vers l'amont, suite à l'abaissement du lit d'un cours d'eau. C'est un phénomène de dynamique fluviale consistant

en une érosion d'un substrat, d'un relief ou d'un ouvrage artificiel qui se propage dans le sens inverse de l'écoulement de l'aval vers l'amont.

1.5- Erodibilité des sols

L'érodibilité des sols autrement dit leur sensibilité intrinsèque aux processus d'érosion, résulte à la fois de leur capacité à absorber les précipitations sans produire de ruissellement et la résistance qu'ils offrent aux agents de détachement, soit l'impact des gouttes de pluie et les forces de cisaillement exercées par l'écoulement superficiel (Souter et *al.*, 2007). L'érodibilité dépend ainsi d'une part du mode d'organisation des particules constitutives du sol (structure, capacité d'infiltration) et d'autre part de l'intensité des forces qui lient ces éléments entre eux (stabilité structurale et/ou cohésion). Ces deux aspects sont cependant étroitement liés : une faible stabilité structurale peut par exemple être cause d'une rapide dégradation de la capacité d'infiltration lors d'une averse (Latrille, 1979).

La structure ainsi que la stabilité, sont grandement conditionnées par la texture du sol, la teneur en matière organique et la présence de diverses substances chimiques. Les propriétés colloïdales de la matière organique, tout comme celles des minéraux argileux, contribuent grandement à la formation d'agrégats stables.

Dans la relation croûte de surface-érosion, la stabilité des agrégats est certainement un très bon indicateur de l'érodibilité des sols. Ce facteur mesure la susceptibilité des sols à la désagrégation, qui est le même processus responsable de la formation des croûtes de surface cependant, l'importance de l'érosion n'est pas contrôlée quand le processus de désagrégation prend place, la grandeur de détachement des particules déterminent deux propriétés physiques de la croûte d'infiltration et la transportabilité des particules (Le Bissonnais et *al.*, 1993).

1.5.1- Indice d'érodibilité des sols (K) de Wischmeier et Smith (1978)

L'indice d'érodibilité des sols est un paramètre très important qui permet de prévoir la sensibilité des sols à l'érosion à partir des caractères intrinsèques du sol comme la texture, la matière organique, la structure et la perméabilité.

Dans le calcul du facteur K de l'équation universelle de pertes de sol, Wischmeier et Smith tiennent compte de la teneur en limon et en sable très fin (0,002 - 0,1 mm), la teneur en sable (0,1- 2 mm), en matière organique (figure 6), ainsi que de la structure de la couche de surface et de la perméabilité du profil. Cette équation est utilisée ici pour générer les cinq classes de vulnérabilité à l'érodibilité:

$$100K = 2,1.M^{1,14} \cdot 10^{-4} (12-a) + 3,25 (b-2) + 2,5 (c-3)$$

Où

M est calculé par la formule $M = (\% \text{ sable fin} + \text{limon}) \cdot (100 - \% \text{ argile})$,

a est le pourcentage de matière organique,

b est le code de la perméabilité: 1) rapide, 2) modérée à rapide, 3) modérée, 4) modérée à lente, 5) lente et 6) très lente (figure 7).

c est le code de la structure : 1) très structuré ou particulaire, 2) assez structuré, 3) peu structuré et 4) massif (Adapté de Drolet et Gagné, 1989).

Tableau 2 : Classes d'interprétation de la perméabilité.

Code	Classe	Valeur	Texture
1	Rapide	> 60 mm/ h	sable
2	Modérée à rapide	20 – 60 mm/ h	Sable limoneux, sableux
3	Modérée	5 – 20 mm/ h	Sablo-limoneux
4	Modérée à lente	2 - 5 mm/ h	Limon argilo-sableux, argileux
5	Lente	1 - 2 mm/ h	limono-argileux, sable
6	Très lente	< 1 mm/ h	Limono-argileux, argile

Selon la texture et la composition physico-chimique des sols, l'action de la battance peut détruire complètement la structure initiale du sol. Il peut ainsi se former des « croûtes de battance » qui rendent le sol beaucoup moins perméable, ce qui accroît le ruissellement et l'érosion.

L'impact des gouttes d'eau change suivant l'importance de la lame d'eau formée à la surface du sol. A une faible lame d'eau, les gouttes d'eau engendrent une turbulence (figure 6) qui accroît le détachement des particules, plus la hauteur de la lame d'eau augmente plus l'impact des gouttes d'eau va diminuer.

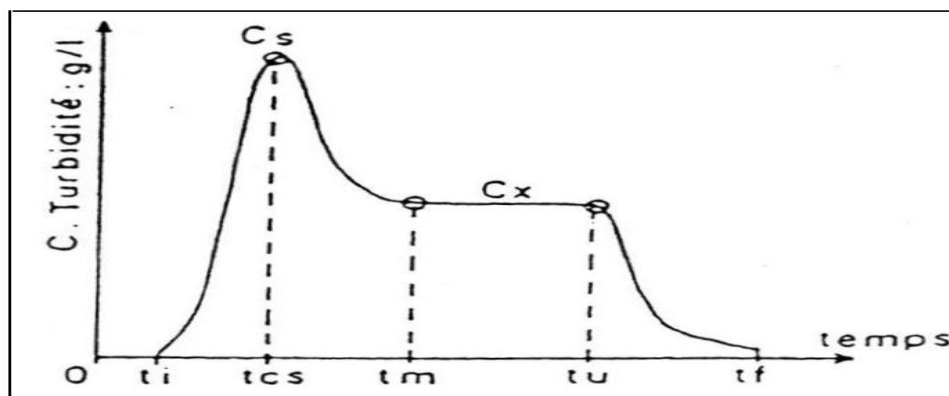


Figure 6 : Turbidigramme de Dumas (1965)

Dumas (1965) a montré que l'érodibilité des sols est fonction du taux de cailloux, du taux de matières organiques, et de l'humidité équivalente du sol, laquelle est fonction de la texture (figure 8). Sur cette figure et dans le cas des sols calcaires méditerranéens, on peut constater que l'augmentation de 1 % du taux de matière organique ne réduit l'érodibilité du sol que de 5 %. Par contre, la présence de 10 % de cailloux dans l'horizon de surface va réduire l'érodibilité du sol de plus de 15 %. Au-delà de 40 % de cailloux, la réduction de l'érodibilité du sol diminue. Dans les paysages le pourcentage de cailloux est donc un signe d'une bonne résistance à l'érosion de ces sols.

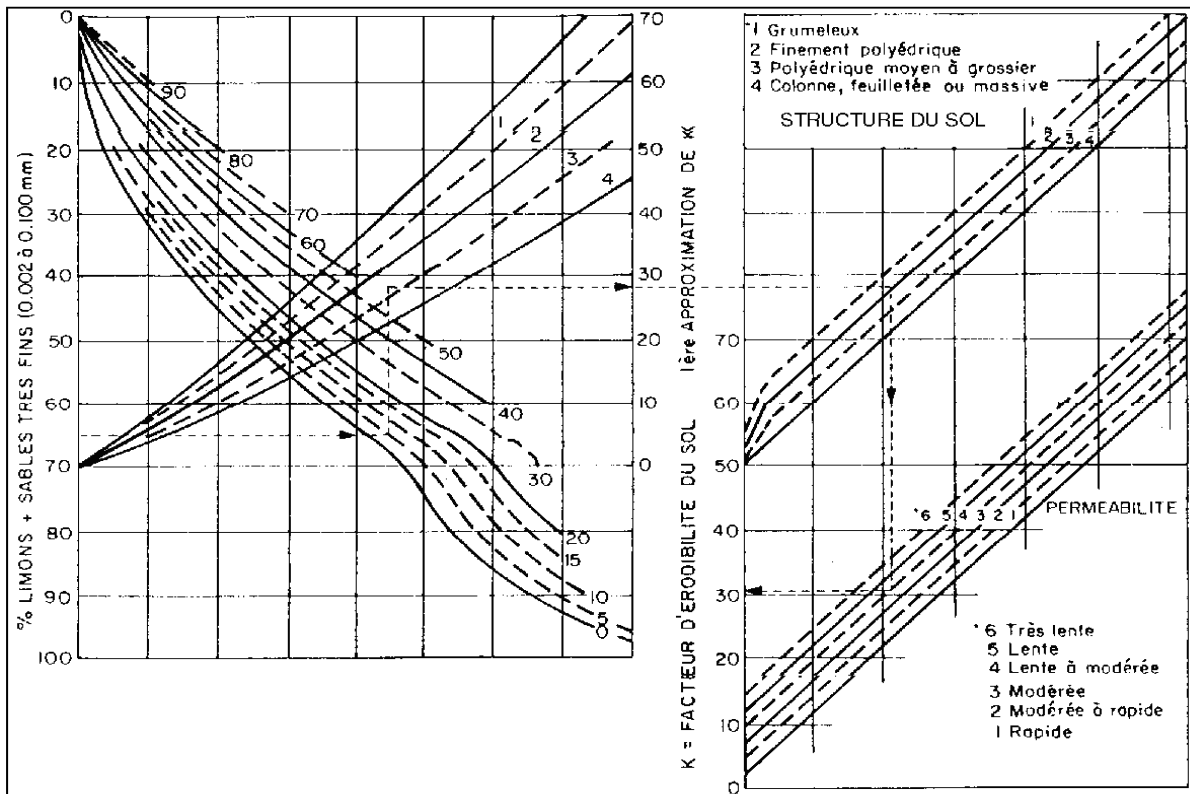


Figure 7 : Nomogramme permettant une évaluation rapide du facteur K d'érodibilité des sols (Wischmeier et al., 1971)

Tableau 3 : Grille d'interprétation de facteur d'érodibilité (K)

Classes d'érodibilité	Sol très peu érodable	Sol faiblement érodable	Sol moyennement érodable	Sol fortement érodable	Sol très fortement érodable
Valeurs de K	$K \leq 0,05$	$0,05 < K \leq 0,1$	$0,1 < K \leq 0,2$	$0,2 < K \leq 0,4$	$K > 0,4$

La présence de fragments de roches dans l'horizon superficiel constitue un bouclier protecteur contre l'action érosive des gouttes de pluies et du ruissellement. C'est ce qui explique la modestie de l'érosion en nappe dans les paysages calcaires méditerranéens (Kouri et al., 1997). Cependant si le sol est encroûté, la couverture caillouteuse peut être à l'origine d'énormes pertes de sol par le cisaillement qu'elle crée (Roose, 1994).

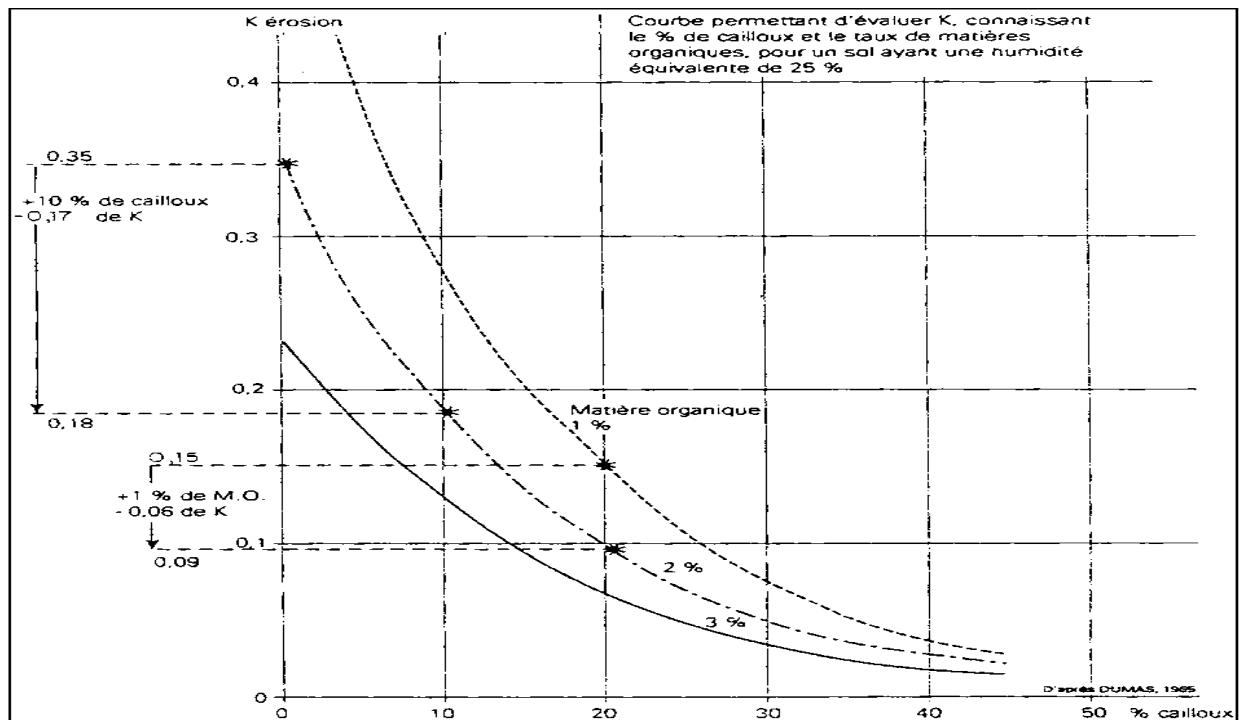


Figure 8 : Erodibilité des sols en fonction du pourcentage de cailloux et du taux de matière Organique (Dumas, 1965).

1.5.2- Paramètres d'érodibilité des sols

L'érodibilité des sols dépend de plusieurs facteurs, ces derniers font intervenir trois grands groupes de paramètres :

- Paramètres structuraux : perméabilité, agrégation en mottes, fissures, porosité, compacité, teneurs en eau.
- Paramètres texturaux : granulométrie, plasticité
- Paramètres physico-chimiques : Taux d'argile, nature minéralogique.

1.5.2.1- Propriétés physico-chimiques

1.5.2.1.1- Perméabilité

C'est la quantité maximum d'eau qui s'infiltré dans le sol au temps «t». Elle dépend des constituants et de l'arrangement de la porosité du sol. Elle varie dans le temps en fonction de l'état de saturation du sol (Le Bissonnais et *al*, 2002).

Plus la texture est particulière, plus le sol est poreux et plus la perméabilité est élevée. Le ruissellement peut être très abondant lorsque le sol est imperméable et compacté. A chaque instant, la surface du sol présente une certaine infiltrabilité définie comme étant le flux maximum qu'elle peut absorber lorsqu'elle est maintenue en contact avec l'eau à la pression atmosphérique. Cette infiltrabilité est déterminée, au moins en partie, par la porosité de l'horizon supérieur. En effet, l'intensité limite d'infiltration et croit linéairement avec le volume occupé par l'air (Casenave et

Valentin, 1989). L'évolution de la surface du sol rend compte de la diminution de l'intensité de l'infiltration. Avant l'apparition du ruissellement, la croûte structurale se met en place, la phase de diminution rapide de l'infiltrabilité du sol correspond à la transformation de la croûte structurale en croûte d'érosion. Enfin, lorsque la croûte d'érosion est bien individualisée, l'intensité d'infiltration se stabilise (Poss et *al.*, 1989).

1.5.2.1.2- Stabilité structurale

C'est l'aptitude de la structure à résister à la désagrégation lors de l'impact des gouttes de pluies sur le sol, exprimée par l'indice d'instabilité structurale de Henin et Monnier (1956). Cet indice a permis la mise en évidence du rôle de la pédogenèse sur la sensibilité à la désagrégation (tableau 4). Elle découle, en effet, de la granulométrie, de la minéralogie des argiles et de leur garniture cationique.

$$IS = \frac{A + LF}{\left(\frac{\sum Agi}{3}\right) - 0,9sg}$$

IS : Indice d'instabilité structurale

A+LF : Fraction fine (Argile + limon fin), diamètre <0,02 mm

Agi : taux d'agrégats stables < 200 μ, obtenus après différents prétraitements.

Sg : Pourcentage de sable grossier >200 μ.

Les sols à texture limoneuse sont instables, mais les sols argileux sont les plus stables. La présence d'argile a une influence négative sur la résistance des agrégats du fait de leurs propriétés de gonflements à l'eau.

Tableau 4 : La stabilité structurale des sols selon les valeurs d'Is (Monnier et Stengel, 1982).

Stabilité structurale du sol	Valeurs I ₀ (I ₀ = Log ₁₀ Is)
Très stable	< 1
Stable	1,0 à 1,3
Stabilité médiocre	1,3 à 1,7
Instable	1,7 à 2,0
Très instable	> 2

1.5.2.1.3- Granulométrie

La granulométrie est la composition d'un sol en sables, limons et argiles exprimée en pourcentage. Les sols limoneux ou limono-sableux sont très sensibles à l'érosion (Bou Kheir et *al.*, 2001). Les sols à texture plus grossière présentent une bonne résistance à l'agressivité pluviale, mais leurs horizons sableux pauvres en matière organique. De part ce qui a précédé, il ressort clairement que les sols sensibles sont ceux qui ont une forte teneur en limons ou de sables fins et ceux contenant peu de matière organique. Selon Monnier et Stengel (1982) l'effet de la texture sur le régime d'infiltrabilité se traduit par l'effet de la composition granulométrique, de la répartition des

classes de tailles et les arrangements des constituants. Cette caractéristique de constitution est essentielle puisqu'elle détermine en grande partie le régime de circulation et de rétention en eau et de la cohésion à l'état humide (Le Bissonnais, 1988).

1.5.2.1.4- Nature minéralogique

La nature minéralogique des constituants et en particulier la phase argileuse détermine le potentiel de gonflement (Monnier et Stengel, 1982). Les argiles gonflantes présentent une plus forte sensibilité à la dispersion par liquéfaction et fissuration que les argiles peu gonflantes. La résistance du sol croît avec l'augmentation de sa cohésion à l'état humide.

Parmi les éléments qui assurent la stabilité des agrégats citons le Fer (Farres and Cousen, 1985). Le calcium sous forme de carbonates est moins efficace que le gypse. Quant au magnésium, son action s'avère néfaste lorsqu'il excède 50 % des bases totales (Collinet et Zante, 2005). Des teneurs en sodium échangeable supérieure à 15-20 % facilitent la dispersion des argiles et donc la formation des croûtes de surface. Des études sous pluies simulées ont montré une forte réduction du taux d'infiltration final jusqu'à des valeurs inférieures à 1mm/h, due à l'augmentation du taux de sodium dans le sol.

1.5.2.1.5- Acide humique

Les acides humiques constituent une des fractions les plus importantes de l'humus. Il forme avec l'argile le complexe argilo-humique, sous forme de ciment qui favorise l'agrégation des particules entre elles, donc l'acide humique augmente la stabilité structurale dans le sol, dans ce cas le sol résiste mieux contre l'érosion. Comme agent hydrophobe, il agit essentiellement sur la mouillabilité du sol et diminue les risques d'éclatement lors de l'humectation (Le Bissonnais et *al.*, 1993), elle freine le développement de croûtes de battance et améliore la résistance au détachement par l'effet splash (Roose, 1994).

L'effet de la matière organique sur la stabilité structurale ne devient sensible que pour des teneurs très élevées (3 à 4 %) très supérieures aux teneurs habituelles de (1,5 à 1,8 %). En fait, un engrais vert n'est utile que si le développement végétal est assez rapide pour protéger la surface du sol avant que la croûte sédimentaire ne soit généralisée et que la rugosité ait disparue (tableau 5).

Tableau 5 : Exemple d'interaction : texture-matière organique sur la stabilité structurale.

Sol	Teneur en argile (%)	Teneur seuil MO (%)	Stabilité d'origine texturale	Stabilité en présence de matière organique			
				1% MO	2% MO	3%MO	4% MO
SL	8	1,05	Passable	Stable	Très stable	Très stable	Très stable
L	15	1,75	Très instable	Très stable	Très stable	instable	Passable
L.A	25	1,75	Instable	Instable	Passable	passable	Passable
A.A	50	3,5	Stable	Stable	Stable	Stable	Très stable

Monnier et Stengel (1982)

La diminution du taux de matière organique lors de la mise en culture, qui entraîne une baisse de la stabilité structurale des agrégats, provoque une modification de l'organisation du système poral des horizons superficiels et l'apparition des pellicules à la surface du sol sous l'effet de l'impact des gouttes de pluie. Selon Bou Kheir et *al.* (2001), les sols méditerranéens contiennent peu de matière organique du fait de l'instabilité du climat ; Ce qui traduit leur grande susceptibilité à l'érosion.

A partir de ce tableau, on remarque que les textures argileuses sont les plus stables et que cette stabilité augmente avec la teneur en matière organique ; les textures limoneuses sont les plus susceptibles à la désagrégation, il ressort aussi que leur correction nécessite de grandes quantités de matière organique. Les textures sablo-limoneuses retrouvent une bonne stabilité structurale quand la matière organique augmente.

1.5.2.1.6- Oxydes et hydroxydes de Fer

Plusieurs travaux ont trouvé une corrélation positive entre les sesquioxydes et la stabilité structurale des sols (Le Bissonais et Le Souder, 1995). Ces oxydes et hydroxydes peuvent agir comme flocculant en établissant des ponts entre argiles et polymères ou comme ciment après avoir précipité sous forme de gel sur les surfaces des argiles. La cohésion qui en résulte augmente la résistance à l'éclatement et à la désagrégation mécanique. Leur effet dépend du pH des sols et il peut induire dans certains cas des agrégats très résistants et des sols très peu érodibles (Le Bissonais et Le Souder, 1995).

1.5.2.1.7- Calcaire (CaCO₃)

L'effet du CaCO₃ sur la stabilité structurale et l'infiltration ou l'érosion n'est pas bien étudié (Le Bissonais et *al.*, 1993), n'ont observé aucun effet du CaCO₃ sur le taux d'infiltration sous pluies simulées. Cependant, Merzouk et Black (1991) ont trouvé que le CaCO₃ est un meilleur paramètre de l'érodibilité des sols. Cependant, l'effet dépend probablement de la distribution de la taille de ses particules ainsi que de la présence d'argile (Le Bissonais et *al.*, 1993).

1.5.2.1.8- Aptitude à la fissuration

Cette propriété exprime l'aptitude intrinsèque d'un matériau à se fragmenter sous l'effet des alternances humectation dessiccation (Monnier et Stengel, 1982).

1.5.2.1.9- Battance

C'est la dégradation de la structure du sol liée à l'action des gouttes de pluies, la surface passe d'un état fragmentaire, poreux et meuble à un état compact. La battance traduit la sensibilité des sols à la fermeture de la porosité, formant une croûte superficielle qui colmate la surface du sol et réduit l'infiltration des précipitations. La formation d'une croûte superficielle est le résultat de la dégradation de la surface du sol. Une telle dégradation de la surface se produit sous l'action de la battance des gouttes de pluie ou par suite de la liquéfaction ou de la dégradation du matériau lors du

mouillage. Elle est exprimée par l'Indice de battance de Boiffin (1984).

$$IF = \frac{1,5 \text{ Limons fins} + 0,75 \text{ Limons grossiers}}{\text{Argile} + 10 \text{ Taux de matière organique}} - C$$

Si $pH > 7$, $C = 0,2$ / Si $pH < 7$, $C = 0$

La battance se traduit par le colmatage, souvent visible à l'œil nu, de la porosité de la partie superficielle du sol, qui s'oppose à l'infiltration de l'eau, à la circulation de l'air, et favorise l'érosion hydrique. La stagnation anormale d'eau, la présence d'une fine croûte sont des indices de battance. En plus, ce phénomène freine l'alimentation en eau et la respiration du sol, au détriment de leur vie biologique et de leur productivité. Elle augmente et contrarie la levée des plantules après la germination. L'étude de la formation des croûtes de battance a été abordée par différentes méthodes sous pluie naturelle ou simulée. Ces études avaient pour but de décrire les déterminismes et les mécanismes de la formation des croûtes de battance sous l'impact des gouttes d'eau et de les relier aux processus d'érosion. Sur le terrain, Boiffin (1984) a mis au point une méthode originale d'observation de la surface du sol. Des méthodes indirectes visant à déterminer certaines des propriétés des croûtes de battance, comme la mesure de la résistance mécanique du sol ou bien la mesure d'infiltration de l'eau dans le sol, sont aussi employées. Cette dernière méthode (mesure de l'infiltration) consiste à évaluer au cours d'une pluie d'une intensité fixe, l'infiltrabilité d'un sol. Cette infiltrabilité diminue au fur et à mesure des pluies jusqu'à atteindre une valeur constante à cause de la dégradation de la surface du sol. Une estimation du risque de battance (R) peut être obtenue en considérant le rapport donné par Remy et Marin-Lafleche (1974) :

Risque de battance (R) : $R > 2$: sol très battant, $1,8 > R < 2$: sol battant, $1,6 > R < 1,8$: sol assez battant, $1,4 > R < 1,6$: sol peu battant et $R < 1,4$: sol non battant

1.5.2.2- Propriétés mécaniques

1.5.2.2.1- Limites d'Atterberg

Cette méthode est applicable pour les sols cohérents à grains fins tels que les argiles.

Atterberg a pratiqué cette technique pour déterminer les états de consistance d'un sol, le domaine d'application pour classer les sols et étudier le compactage.

En mécanique des sols on appelle cohésion l'aptitude que possède un sol à maintenir ses grains reliés les uns aux autres. Les sols doués de cohésion sont appelés sols cohérents. Les sols qui n'ont pas de cohésion (ou qui ont très peu de cohésion) sont appelés grenus ou pulvérulents.

Le comportement des sols pulvérulents est quasi-indépendant de leur teneur en eau. Par contre lorsque le sol est cohérent, la teneur en eau joue un rôle fondamental dans le comportement de ce sol. Les sols cohérents forment des pâtes dans lesquelles les grains sont reliés les uns aux autres par

les forces de cohésion dues à la présence de l'eau absorbée. Pour ces sols, en fonction de l'abondance de l'eau le sol aura une consistance liquide lorsqu'il contient beaucoup d'eau, il aura la consistance pâte à des teneurs en eau modérées et prendra la consistance solide à faible présence d'eau.

A l'état liquide, les grains du sol sont indépendants et ne se touchent pas. Leurs mouvements relatifs sont très aisés.

A l'état plastique, les grains se sont rapprochés et ont mis en commun leur eau absorbée qui agit comme un sachet en plastique dans lequel les grains peuvent se mouvoir sans s'écarter.

A l'état solide les grains sont maintenus serrés par une grande force de cohésion en chassant l'eau absorbée.

Par humification (augmentation de la teneur en eau) ou par séchage (diminution de la teneur en eau) le sol cohérent passera d'un état de consistance à un autre de manière progressive.

Néanmoins Atterberg, a défini en 1911, des teneurs en eau limites qui séparent le passage du sol d'un état de consistance à un autre. Ces teneurs en eau sont appelées limites de consistance ou limites d'Atterberg. La consistance d'un sol varie de façon continue selon la teneur en eau, le sol passe successivement de l'état solide à l'état plastique puis à l'état liquide (figure 9).

L'appareil de Casagrande permet de mesurer la limite de liquidité.

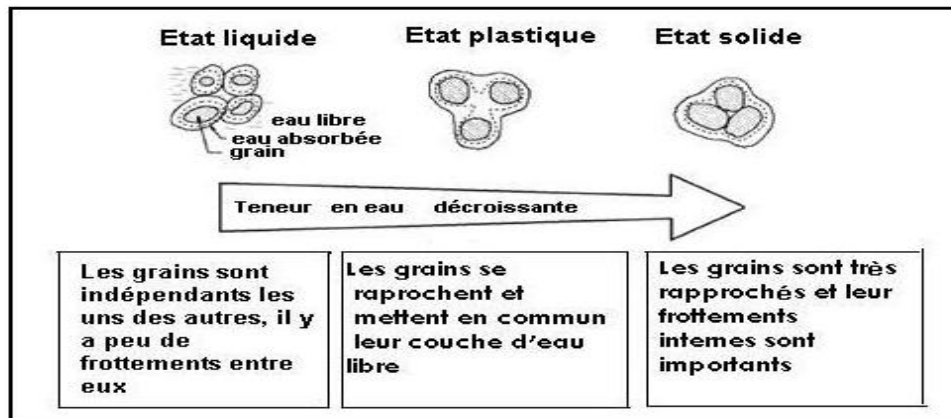


Figure 9 : Variation de la consistance d'un sol selon la teneur en eau

1.5.2.2.1.1- Limite de liquidité W_L

Définit la teneur en eau limite qui sépare le passage du sol de la consistance plastique à la consistance liquide.

1.5.2.2.1.2- Limite de plasticité W_P

Définit la teneur en eau limite qui sépare le passage du sol de la consistance plastique à l'état solide friable. Ces teneurs en eau limites sont déterminées expérimentalement sur la fraction du sol qui passe au tamis 0,4 mm : On exprime l'étendue du domaine de plasticité ; l'étendue des teneurs

en eau pour lesquelles le sol garde une consistance plastique par un paramètre ; l'indice de plasticité qu'on note I_p , est défini comme la différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité.

Tableau 6 : Classification des sols selon l'indice de plasticité.

Indice de plasticité	Degré de plasticité
$0 < I_p < 5$	Non plastique
$5 < I_p < 15$	Moyennement plastique
$15 < I_p < 40$	Plastique
$I_p > 40$	Très plastique

Plus l'indice de plasticité est élevé plus le sol est sensible aux effets de gonflement par l'humification ou de retrait par dessiccation (tableau 7).

Tableau 7 : Indice de plasticité selon la texture des sols.

Texture des sols	Indice de plasticité (IP)
Argile	$I_p > 30$
Argile limoneuse	$20 < I_p > 30$
Limon	$10 < I_p > 20$
Sable argileux	$5 < I_p > 20$
Sable limoneux	$5 < I_p > 15$

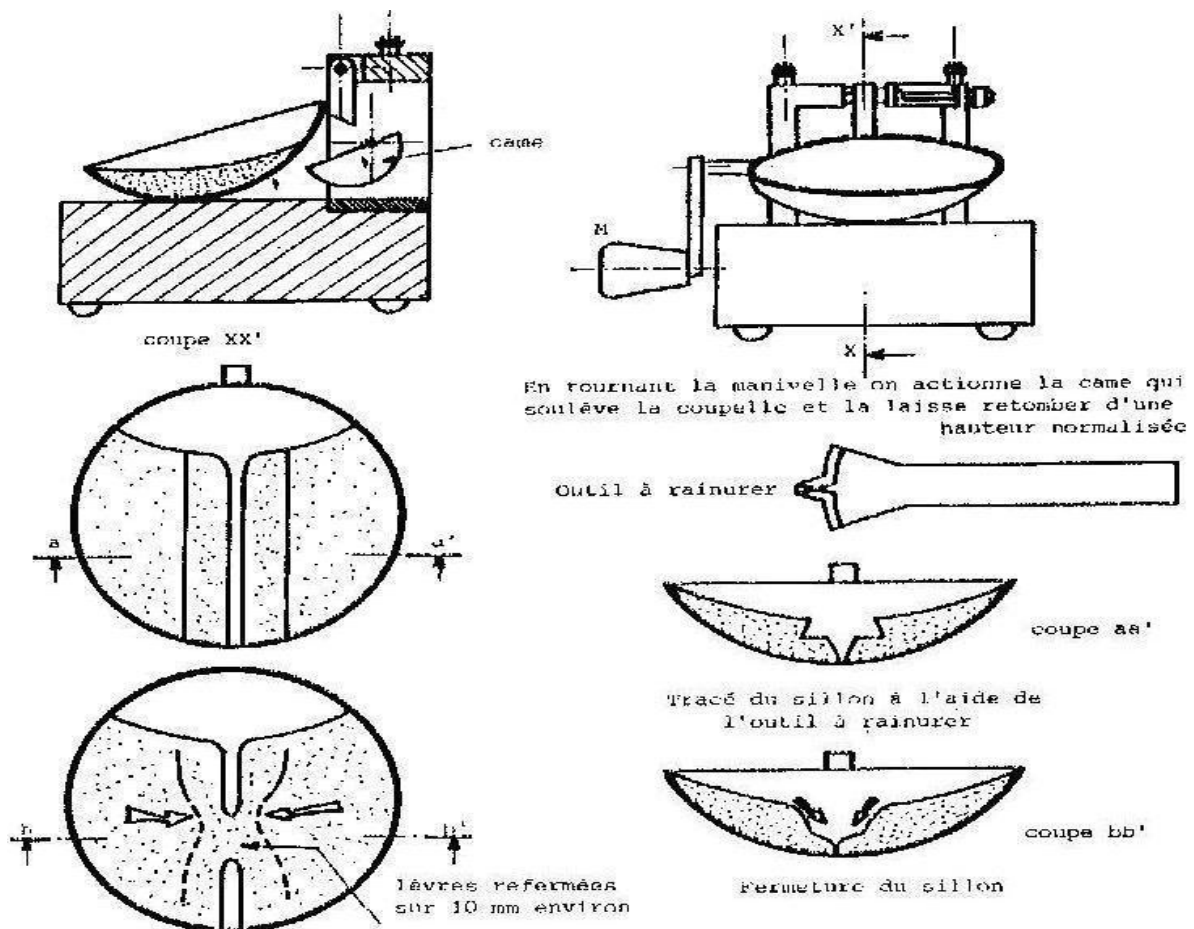


Figure 10 : Détermination de la limite de liquidité

1.5.2.2.2- Résistance au cisaillement

Dans un massif de sol, les déformations résultent principalement d'un glissement des particules, mais ce mécanisme est différent suivant qu'il s'agit d'un matériau cohérent ou pulvérulent. Une faible cohésion du sol induisant une forte susceptibilité au détachement et au mouvement de masse peut être à l'origine d'une forte érodibilité.

Par définition, la résistance au cisaillement d'un sol est la contrainte de cisaillement dans le plan de rupture, au moment de la rupture.

L'essai de cisaillement à la boîte est destiné à évaluer les caractéristiques mécaniques d'un sol (naturel reconstitué ou artificiel), c'est-à-dire la cohésion (C) et l'angle de frottement interne (φ), dont la dimension maximale des grains est définie par la dimension de la boîte

- $d_{\max} \leq 5$ mm dans le cas de la boîte de 60 mm de côté,
- $d_{\max} \leq 8$ mm dans le cas de la boîte de 100 mm de côté.

1.5.2.2.2.1- Essai de cisaillement rectiligne

L'appareillage est constitué de deux demi-boîtes métalliques rigides de section (S) circulaire (cisaillement annulaire) ou carré pouvant glisser l'une par rapport à l'autre selon un plan horizontal. La demi-boîte inférieure est entraînée par un chariot à vitesse constante, la demi-boîte supérieure est reliée à un bâti fixe par l'intermédiaire d'un anneau dynamométrique.

Un échantillon de sol est placé à l'intérieure des deux demi-boîtes, entre deux pierres poreuses permettant éventuellement un drainage, et est soumis à une force normale (N) à de compression verticale à l'aide d'un système de bras de levier, qui transmet l'effort exercé par des charges placées sur le plateau, l'échantillon se trouve cisailé suivant un plan imposé horizontal par une force de cisaillement (T). L'effort de cisaillement T est lu sur l'anneau dynamométrique.

On notera que l'on a affaire à une sollicitation mixte :

- On impose une contrainte normale à l'échantillon (N),
- On impose également une vitesse de cisaillement dite vitesse de déformation.

Deux comparateurs pour mesure les déformations verticales (Δh) et horizontales (Δl) de l'échantillon, qui permet ainsi de mesure les variations de volume de l'échantillon.

Dans le plan de cisaillement imposé (annulaire ou rectiligne) les contraintes sont données par

Contrainte normale (constante) : $\sigma = N/S$

Contrainte tangentielle (variable de zéro à la valeur de rupture) : $\tau = T/S$



Appareillage spécifique au cisaillement

Echantillon à cisailier placé à l'intérieur des deux demi-boîtes

Photo 1 : Appareillage de cisaillement des échantillons des sols

Pour une valeur fixe de la contrainte normale et de la vitesse de cisaillement, on enregistre une variation de (τ) en fonction de la déformation ($\Delta l/l$) au cours du cisaillement (photo 1). Deux types de courbes peuvent être observés suivant la nature et la compacité initiale du sol (courbe représentant un pic ou courbe sans pic

La contrainte de cisaillement est celle donnée par rupture.

La détermination de contrainte σ et τ lors de la rupture permet de préciser un point de courbe intrinsèque du sol étudié. On répétant l'essai 3 et 4 fois (on faisant varier la contrainte normale de compression σ) on obtient la courbe intrinsèque d'équation ou loi de Coulomb :

$$\tau = C + \sigma \cdot \text{tg} (\varphi)$$

CHAPITRE II
CARACTERES PHYSIQUES

2- Situation géographique du Tell oranais

Le Tell oranais est un grand ensemble du Tell occidental (figure 11). Il s'étend sur une superficie de 42.440 km², dans la partie occidentale de l'Algérie. Il est limité au Nord par la Mer Méditerranée, à l'Est par les Monts du Dahra et le massif de l'Ouarsenis, au Sud par la limite septentrionale des Hauts plateaux et à l'Ouest par la frontière Algéro-Marocaine.

2.1- Caractères généraux du Tell oranais

2.1.1- Géomorphologie

Le Tell oranais s'appuie sur les massifs occidentaux de l'Atlas tellien, au Sud-Ouest les monts de Tlemcen qui atteignent 1800 m, à l'Est les contreforts précédant l'Ouarsenis. L'Oranie Nord-occidentale est constituée par une série de plateaux peu élevés, ceux de Tlemcen, Sidi Bel-Abbès et Mascara sont coupés par les vallées de la Tafna, de l'Isser, du Sig, de l'Habra, de la Mina, se prolongent jusqu'à la Méditerranée par des plaines littorales ou sub-littorales d'importance inégale: plaine étroite de Maghnia, celles d'Oran et de la M'léta, en partie occupée par le lac salé de la grande Sebkhia, de Mohammadia, Relizane et du bas-Chélif. Un cordon de basses montagnes, entr'ouvert seulement à Oran et à la Macta, sépare ces plaines du littoral. Ce cordon est constitué des massifs des Traras, du Murdjadjo, le chaînon de Bel-Hacel, extrémité Sud-occidentale du Dahra (Aubert et Monjauze, 1946).

2.1.1.1- Altitudes

Le Tell oranais est caractérisé par des reliefs accidentés (zones montagneuses) variant de 300 à 1800 m d'altitude (figure 12), il est constitué d'unités topographiques hétérogènes :

Les reliefs des chaînes littorales du secteur d'Oran présentent des altitudes qui varient de 150 à 616 m comme le djebel Kahar (Montagne des lions).

Le massif de Djebel Murdjadjo (624 m) se trouve à l'Ouest d'Oran et le Djebel Douze qui se situe entre Oran et Arzew. A l'Est, le puissant massif des Traras, Djebel Filhaousen à 1136 m et les monts de Tessala atteignant 1051 m. Les monts des Beni Chougrane culminent à 910 m d'altitude, couvrant une superficie de 330.000 ha, répartie sur les wilayates de Mascara (60 %), Sidi Bel Abbès (20 %) et Relizane (20 %). Les monts de Frenda, Saida, Dhaya et Tlemcen se trouvent dans le même transect Est-Ouest (Tinthoin, 1948).

2.1.1.2- Pentés

Les classes de pentes de la région d'étude obtenues au moyen du modèle numérique de terrain (MNT) sont généralement moyennes à élevées. Les zones à faible pente 0-12 % couvrent une superficie de 3.773,11 km² soit 8,88 % de la surface totale de la région d'étude, alors que celle des moyennes pentes (12-21 %) occupent une superficie de 7.550,47 km² soit 17,77 %. Les pentes

élevées, comprises entre 21-25 % occupent une surface de 30.210,39 km² soit 71,10 % du territoire, alors que les pentes supérieures à 25 % couvrent seulement 956,03 km² soit 2,25 %.

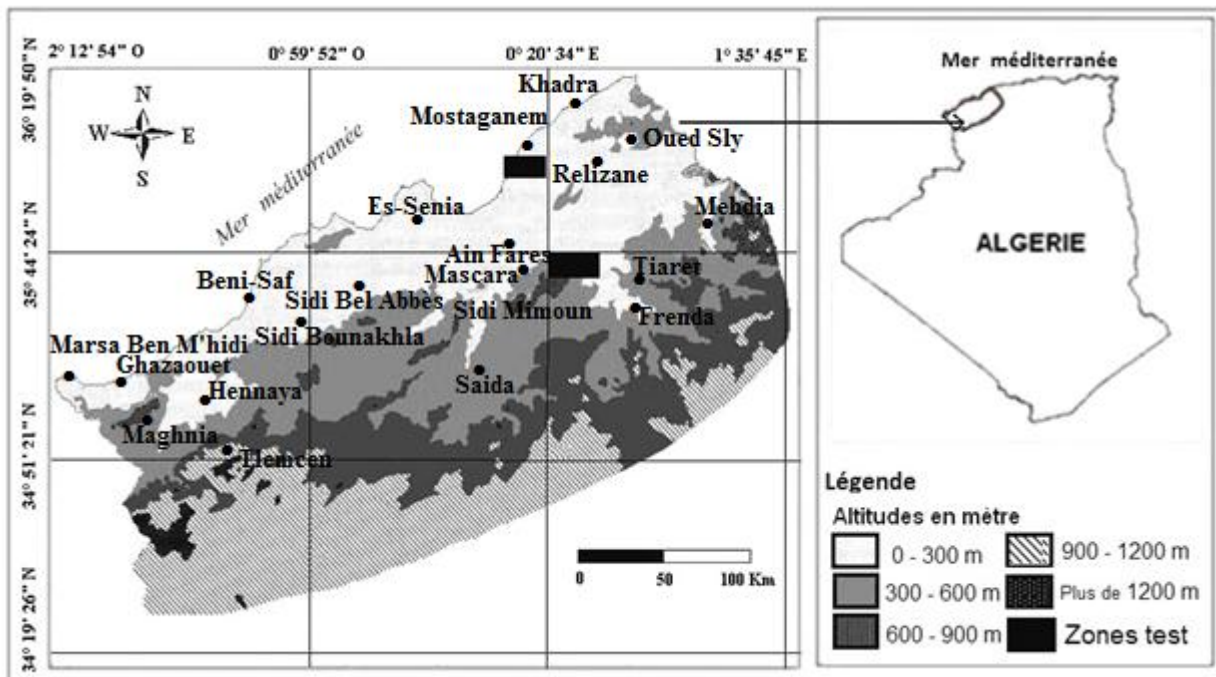


Figure 11 : Localisation géographique et hypsométrie du Tell oranais

2.1.1.3- Expositions

Conjuguée à une altitude importante du point de vue impact sur les précipitations et la brise marine, l'exposition a un effet sur les conditions écologiques du Tell oranais.

Le versant Nord bénéficie de conditions climatiques et édaphiques plus clémentes, une brise marine avec ses effets adoucissants en été, une faible évaporation, des sols relativement équilibrés et une pluviométrie intéressante.

Le Tell oranais est caractérisé par un certain nombre de versants de forme concavo-convexe (figure 12). Selon Halitim (1988) et Benchetrit (1972) le Tell oranais est partagé en plusieurs unités géomorphologiques qui va du Nord vers le Sud :

- Le Sahel avec des altitudes varient de 300 à 500 m
- Les basses plaines caractérisées par des altitudes varient de 40 à 100 m
- L'Atlas plissé : de 600 à 1000 m.
- Les Hautes plaines Telliennes : de 600 à 1000 m
- L'Atlas tabulaire : de 900 à 1843 m.
- Les Hauts plateaux : 1000 à 1616 m.

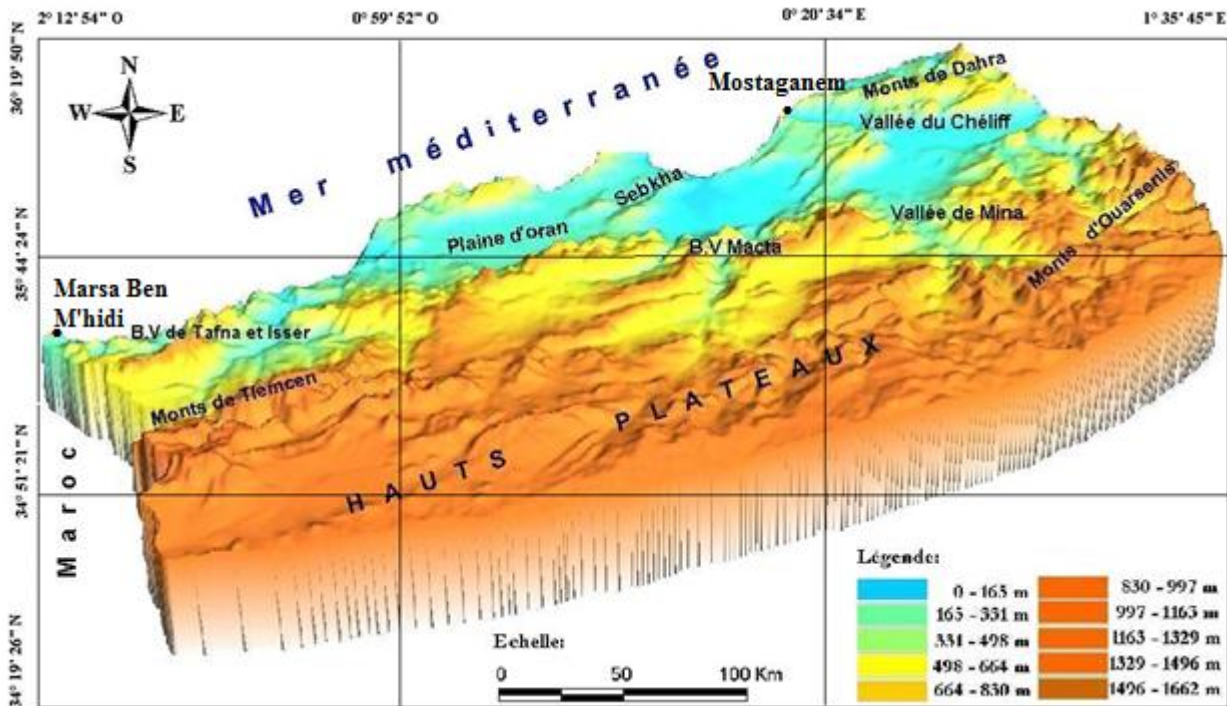


Figure 12 : Principales unités morphologiques du Tell oranais

2.1.1.4- Dépressions

2.1.1.4.1- Sebkhia d’Oran

Elle est située à quelques kilomètres de la mer (figure 13). Elle a la forme d’une lentille allongée d’environ 45 km de long sur une largeur maximale de 12 km. C’est une dépression fermée, limitée au Nord par le massif du Murdjadjo dont l’altitude maximale est de 589 m, au Sud par le massif de Tessala dont l’altitude maximale est de 1061 m. Elle est constituée d’un terrain halomorphe, formé d’alluvions récentes (lagune sub-fossile), alimentée par les eaux de ruissellement du bassin hydrographique et une nappe phréatique salée, peu profonde, dont le niveau fluctue au cours des saisons. Les bordures de cette Sebkhia, sont formées de limons argilo-sableux ou de marnes rouges dessinant souvent un décrochement brusque de la ligne de pente des terrains récents sur les rives même du lac. Ils reposent sur des terrains miocènes marneux ou calcaires karstiques.

La sebkhia est formée par une mince pellicule d’eau dépourvue de végétation à l’intérieur.

Autour de la sebkhia subsiste une végétation halophile composée de *Sueada sp.*, de *Juncus sp.* et de petites touffes de *Chamaerops humilis* et de quelques rares spécimens de Tamarix. Les terres avoisinant la grande Sebkhia sont utilisées par l’agriculture. Les bassins versants sont occupés par des forêts de Pin d’Alep, d’Eucalyptus, de Chêne liège et de Thuya.

2.1.2 – Réseau hydrographique

C'est l'ensemble des oueds permanents ou temporaires ainsi que les lacs et les réservoirs existants dans la région.

Un bassin versant est l'unité fondamentale dans une étude hydrologique, jouant un rôle primordial dans la détermination des différents comportements du régime hydrologique. Un bassin versant est une zone dans laquelle toutes les eaux s'écoulent vers une même voie de drainage ou nappe, réunies par le système de rigoles, de fossés, de canaux et de nappes, les ressources en eaux superficielles sont constituées par les cours d'eau et les accumulations, ces eaux déversent dans les retenues collinaires ou dans la mer (Topper *et al.*, 1985).

2.1.2.1- Cours d'eau (Oueds)

Le réseau hydrographique très dense constitue une menace potentielle sur la région notamment en matière de transport de sédiments, d'envasement des barrages et d'inondation des zones en aval.

Les principaux oueds du Tell oranais sont, en allant du Sud au Nord (figure 13) : la Tafna, grossie de l'Isser occidental ; le Rio Salado, au Sud-Ouest de la sebkha d'Oran ; la Macta qui naît d'un marais où viennent se joindre le Sig et l'Habra ou oued-el-Hammam, et a son embouchure au fond de la baie d'Arzew. Ces oueds traversent le Tell oranais causant le départ de sédiments après les fortes précipitations.

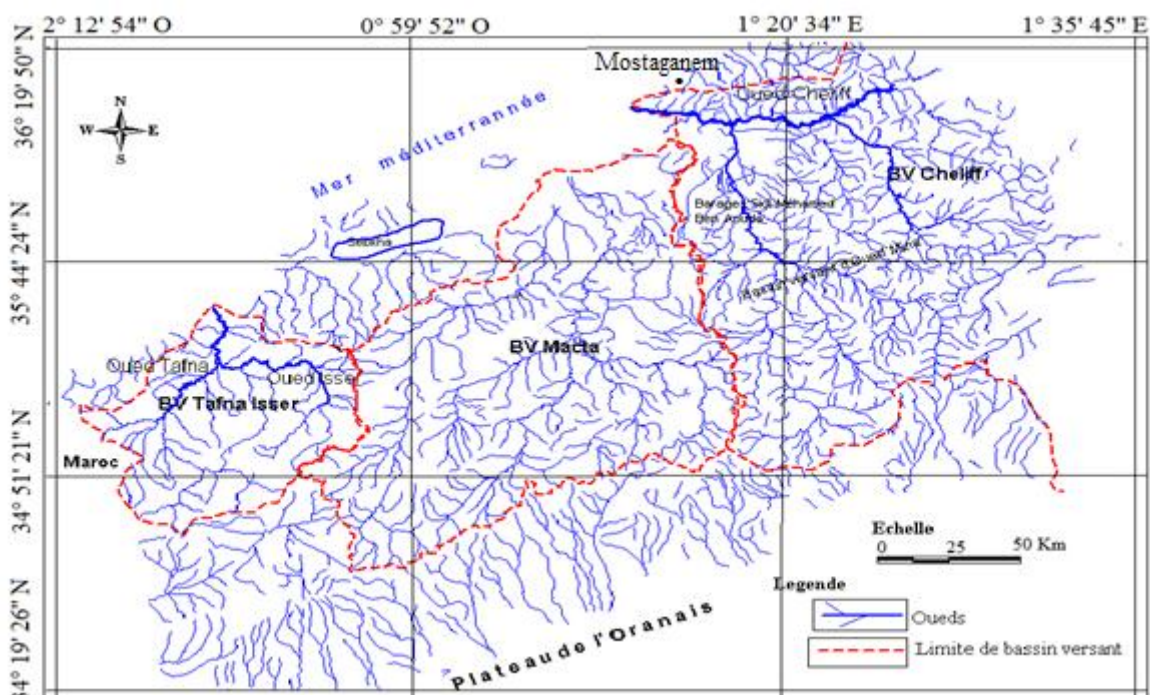


Figure 13 : Réseau hydrographique du Tell oranais

2.1.2.1.1- Transport solide dans les Oueds du Tell oranais

D'après Demmak (1982), sur une superficie de 2.000 km², avec une précipitation ne dépassant pas 400 mm, la quantité de sédiments des sols marneux transportés par les écoulements de l'Oued Cheliff vers le barrage de Ghrib est de 1700 t/m³/an, par contre sur une superficie de 1300 km², avec une précipitation de 483 mm, la quantité de sédiments des sols calcaires transportés par les écoulements d'Oued Mina vers le barrage de Bakhada est de 139 t/m³/an. Dans ce cas, l'érosion hydrique cause plus de dégâts dans les zones marneuses que dans les zones calcaires.

Le tableau 8, montre que l'érosion hydrique dans le Tell oranais est plus active dans les substrats marneux que dans les substrats calcaires, les sédiments transportés sont très élevés sur sol marneux, malgré la faible quantité de pluie. Alors que dans le substrat calcaire sur une superficie beaucoup plus large avec des précipitations très importantes, le transport solide reste faible.

Tableau 8 : Transport des sédiments de quelques Oueds dans le Tell oranais.

Références Auteurs	Oueds	Stations	Superficies (km2)	Pluie mm/an	Écoulement (mm/an)	Concentration (g/l)	Erosion T/m3/an	Lithologie Dominante
Thevenin	Cheliff	Ghrib	2000	-	-	20,0	1500	Marne
Demmak	Cheliff	Ghrib	2000	-	-	-	1700	Marne
Tixeront	Cheliff	Ghrib	22300	381	6,2	30,3	188	Marne
Licitri	Cheliff	Ghrib	23300	345	6,4	26,6	170	Marne
Thevenin	Fergoug	Barrage	-	-	23	1,6	37	-
Demmak	Hammam	Zit Emba	485	594	74113	2,7	197	Grés
Tixeront	Hammam	3 Rivières	7605	-	19	1,4	26	Cal, Grés
Licitri	Hammam	3 Rivières	7600	445	19	1,4	26	Cal, Grés
Tixeront	Hammam	B. Hanifa	7854	418	18	5,0	89	Cal, Grés
Licitri	Hammam	B. Hanifa	7850	445	18	9,4	174	Cal, Grés
Tixeront	Meffrouche	Tlemcen	90	675	218	0,1	25	Calcaire
Licitri	Mekerra	Chanzi	1850	394	13	2,3	30	Calcaire
Licitri	Mekerra	S.B-Abbés	3050	493	10	1,2	12	Marno.cal
Tixeront	Mina	Bakhada	1300	483	52	2,7	139	Calcaire
Licitri	Mina	Bakhada	1300	500	55	5,6	310	Calcaire
Tixeront	Mina	A.Amara	5460	-	37	4,0	149	Calcaire
Licitri	Mina	A.Amara	5460	435	37	4,1	150	Calcaire
Tixeront	Tafna	B.Bahdel	1016	542	78	3,4	264	Calcaire
Licitri	Tafna	B.Bahdel	1016	555	75	3,5	260	Calcaire
Tixeront	Tafna	B.Rhara	4400	486	31	3,6	113	Calcaire
Tixeront	Tafna	R. du chat	6900	-	41	3,5	145	Calcaire
Licitri	Tafna	R. du chat	6900	496	40	3,6	145	Calcaire
Tixeront	Yesser	Remchi	1860	499	59	-	-	Calcaire
Licitri	Yesser	Remchi	1860	544	85	6,2	520	Calcaire
Demmak	Yesser	Remchi	1935	486	59	2,0	116	Calcaire

Demmak, (1982)

2.1.3- Géologie

La géologie et la lithologie constituent des données importantes pour la connaissance du milieu. Il nous a paru utile d'indiquer la part attribuée aux différentes formations géologiques comme source de matériau alluvionnaire et comme roche mère.

Le Tell oranais présente une grande hétérogénéité dans le secteur Nord, Contrairement au secteur Sud beaucoup plus homogène. Au Nord, on rencontre du Crétacé inférieur, des formations Post

pliocènes, du Basalte récent et du Miocène (moyen, inférieur marin, continental et oligocène) assez résistants, alors qu'au Sud du Jurassique supérieur et moyen, des calcaires dolomitiques durs et Crétacé (inférieur et supérieur), (figure 14).

La majorité des sols sensibles à l'agressivité des pluies, se sont formés sur les schistes marneux, des marnes éocènes et miocènes, du calcaire tendre à lithothamnium et des sables pliocènes ou quaternaires, tous sédiments aisément affouillables par les eaux s'ils sont en pente et dans tous les cas cédant facilement aux influences éoliennes (Aubert et Monjauze, 1946).

Le Tell oranais est caractérisé par une topographie assez simple et régulièrement ordonnée, s'organisent de part et d'autre d'une ligne qui forme une sorte de dorsale :

- La série de chaînons de l'Atlas Tellien ;
- La série des basses plaines : de M'leta à l'Ouest et de Habra à l'Est ;
- La série des hautes plaines : de Sidi Bel-Abbès à l'Ouest et ceux de Ghriss à l'Est (Benchetrit, 1972).

Le Bas Chélif est une plaine d'alluvions quaternaire. Elle est ceinturée par les piémonts du Dahra au Nord et de l'Ouarsenis au Sud de l'âge Miocène et Pliocène (tertiaire), qui lui fournissent un matériau pour l'érosion. Le lit de l'Oued Chélif qui traverse la plaine du bas Chélif, constitue le fond du bassin d'accumulation. Les alluvions sont constituées essentiellement par des matériaux récents originaires des bassins versants du Chélif, dominés par des schistes et des marnes du Miocène, souvent riches en sels.

Des chaînes littorales du secteur d'Oran, s'élèvent surtout du Jurassique et du Crétacé avec schistes, quartzites et calcaires néocomiens.

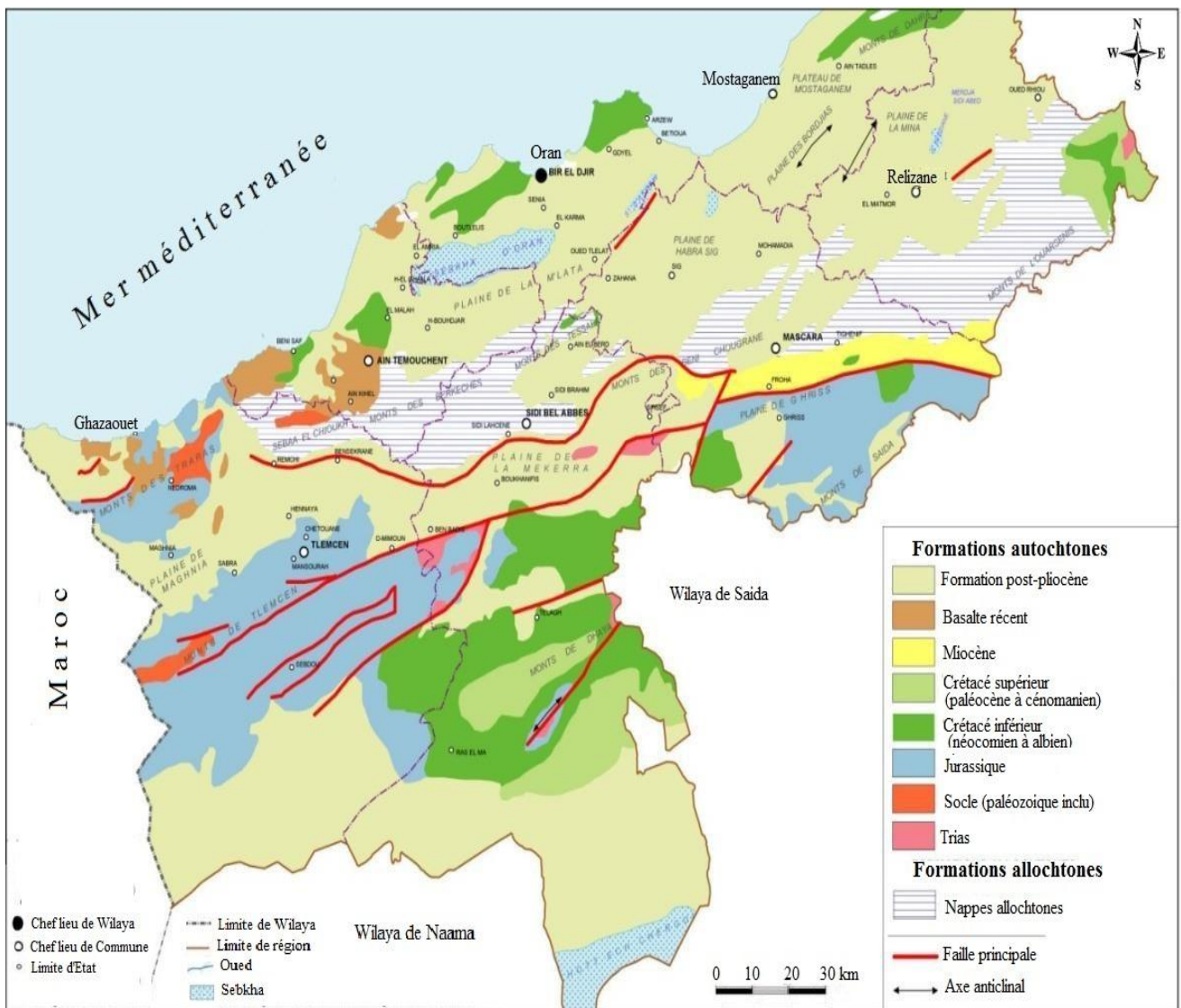
Dans le massif des Traras, se trouvent des schistes broussailleux et les monts de Tessala sont constitués de l'éocène nummulitique avec des tâches du crétacé supérieur. Les formations géologiques prédominantes de Tessala sont les marnes, les argiles et les grès tendres du Néogène sur les marnes et les calcaires marneux du Paléogène et du Crétacé, ces formations sont diversifiées et chaque unité topographique est caractérisée par des formations d'âge et de structures différentes (Dellaoui, 1952).

Le bassin versant d'Isser est constitué de trois grands ensembles lithologiques : les formations du quaternaire, les formations du plio-quaternaire comme les formations plio-villafranchiennes, les alluvions pliocène et le tertiaire, le miocène moyen est constitué essentiellement par une épaisse série d'argiles marneuses grises ou bleutées dont la masse devient ocre par altération (Chebbani et *al.*, 1999). Les monts de Tlemcen relèvent essentiellement du jurassique supérieur ou moyen et les monts de Beni Chougrane présentent des couches argilo-marneuses de calcaire miocène au centre et

une longue bande de crétacé inférieur et du nummulitique fortement redressés, culminant au Nord (Chareb er-Rih de 910 m).

Les monts de Dhaya sont dominés par le crétacé inférieur avec de grès-calcaires néocomiens. Les monts de Saida, Tlemcen et Dhayas constituent ce que l'on appelle l'Atlas tabulaire, ce dernier sépare les hautes plaines steppiques par les hautes plaines telliennes (Alcaraz, 1982).

Cette grande diversité sur le plan géologique joue un rôle capital dans la détermination et l'explication du processus d'érosion.



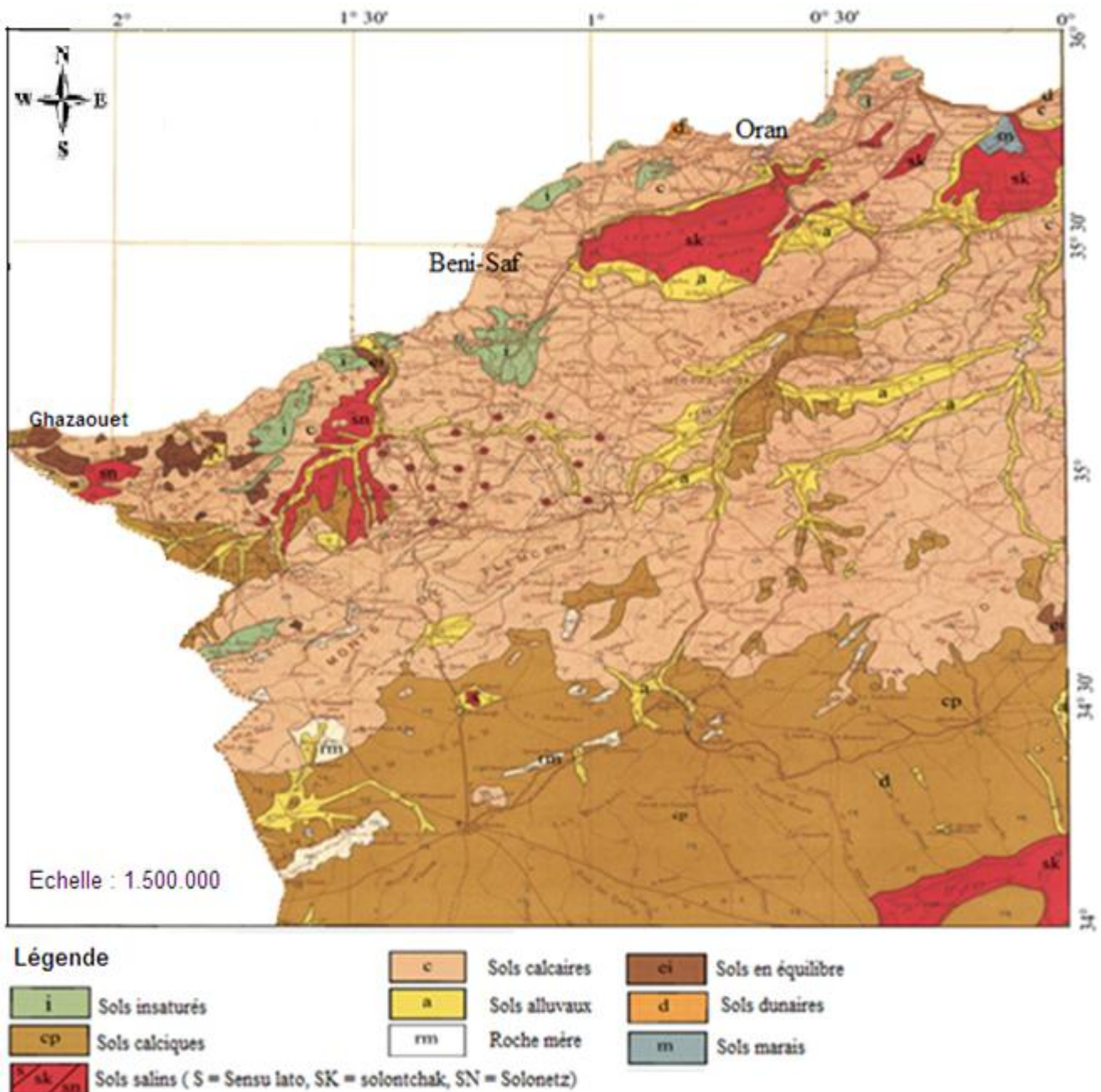
(Source : Agence Nationale de l'aménagement du Territoire, 2000)

Figure 14 : Carte géologique du Tell oranais

2.1.4- Pédologie

L'interdépendance du climat et de la géologie de la région du Tell oranais a favorisé l'apparition de sols diversifiés.

Les types de sols d'Algérie sont multiples et variés. Certains travaux menés par Halitim (1988) ont permis de déterminer les différents types de sols, leurs caractéristiques essentiels et de situer leur importance dans la zone algérienne méditerranéenne.



(Source : Inspection générale de l'Agriculture, 1954)

Figure 15 : Carte des sols de la partie Ouest du Tell oranais

Les principales unités pédologiques caractérisant les sols du Tell oranais sont décrits ci-dessous :

- Sols calcaires

Ce sont des sols très répandus dans la région, on les trouve dans deux oueds : Tafna et Mouilah, dans les Monts de Traras et sur les piedmonts Nord des monts de Tlemcen, dans Beni-Chougrane et les hauts plateaux (figure 15).

- Sols bruns calcaires

Ce type de sol se rencontre sur un substratum formé de marne, marne calcaire et marne argileuse. Ils sont dominants dans les bassins d'oued Mina (figure 16) et les Monts de Tessala est surtout les rendzines qui caractérisent aussi les monts de Beni Chougrane (Morsli, 1996).

- Sols calciques

Ces sols sont localisés le long de la vallée de l'oued Mouilah et celle de la Tafna. Ils se sont formés aux dépens des sédiments caillouteux des montagnes voisines.

- Sols humifères

Ce type de sol se développe surtout sur la rive droite de l'oued Mouilah.

- Sols alluviaux

Ce sont des sols généralement calcaires et lourds qui constituent les terrasses modernes et récentes des oueds (figure 15).

- Sols à croûte calcaire

Ils s'observent fréquemment dans les Hauts plateaux, les vastes surfaces encroûtées du quaternaire ancien et moyen attestent de l'extension considérable des sols à croûte calcaire sur des matériaux très divers : alluvions, colluvions de piedmont, calcaire lacustre, argiles sableux rouges du tertiaire continental, etc. Les croûtes sont d'autant plus épaisses et consolidées qu'elles se trouvent sur des surfaces plus anciennes et en zones plus arides.

- Sols gypseux

Ils se trouvent dans les zones salées, il s'agit essentiellement des sols calcimagnésiques à encroûtement gypseux de surface très classique dans les zones arides en particulier les sols halomorphes (sols salsodiques).

- Sols à sesquioxyde de fer

Ce sont des sols rouges ou bruns rouges, leur texture est en générale équilibrée et leur structure grumeleuse. Ces sols sont occupés essentiellement, de céréales et de fourrages, c'est pourquoi, ils représentent une grande valeur agricole.

- Sols peu évolués

Ce sont des sols lessivés, dégradés par l'érosion hydrique, on les rencontre généralement sur des grès tendres et friables, ils occupent souvent le haut des versant sur grès. L'horizon de surface

est limono-sableux, tandis qu'en profondeur, la texture est sableuse et moins riche en éléments nutritifs.

- Vertisols

Ce sont des sols formés sur marnes de couleur noirâtre ou brun foncé, leur texture est limono argileuse et la structure est généralement grumeleuse. Les sols vertiques sont très peu perméables, une fois le profil humecté et les argiles gonflées (Roose, 1993).

- Sols d'alluvions anciennes et récentes

Ce sont des limons plus ou moins caillouteux en profondeur et d'apports sableux et limoneux enrichis en sable. On trouve ce type de sol dans le plateau de Mostaganem (Smahi, 2001).

2.1.5- Occupation des sols

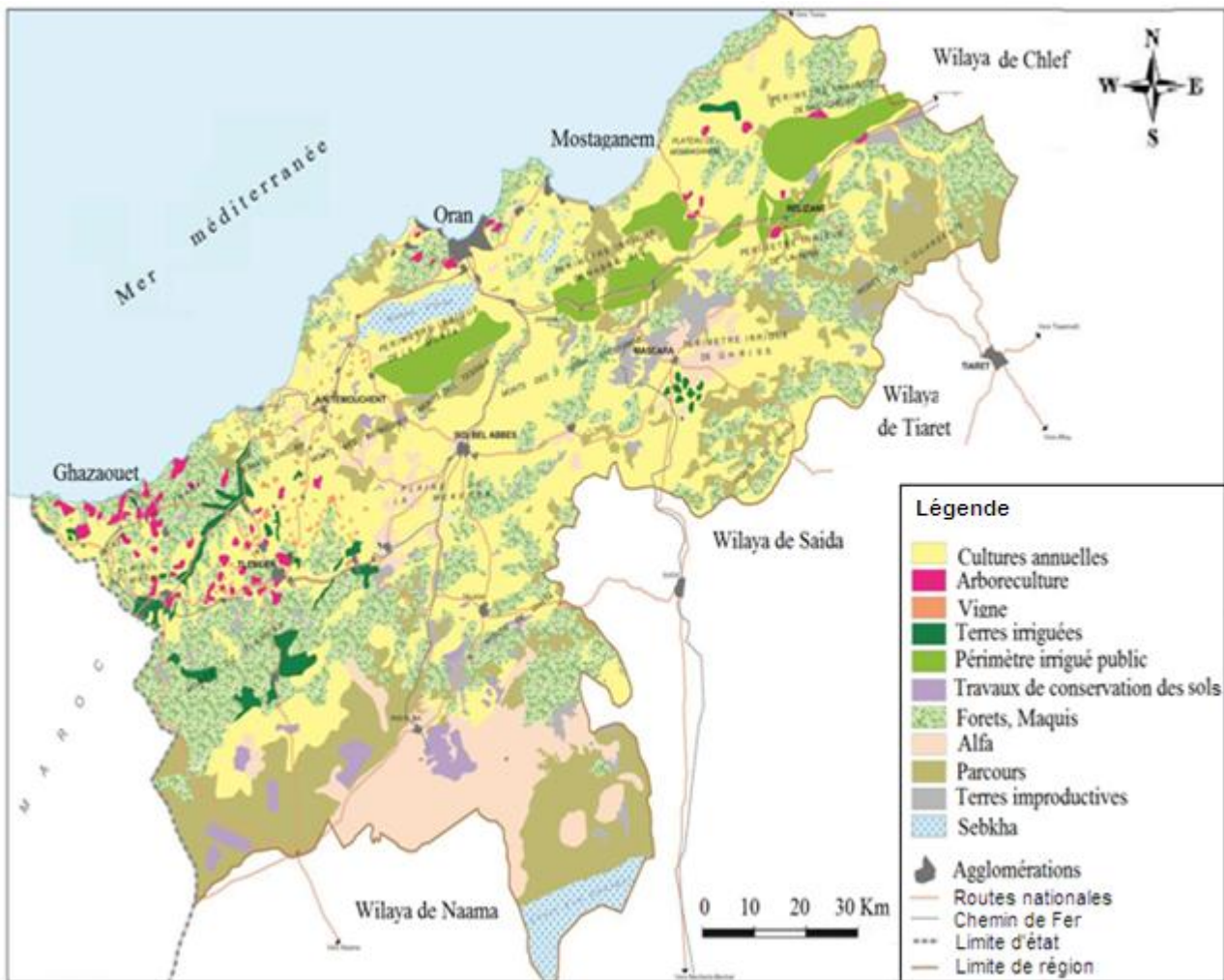
Le couvert végétal du Tell oranais, offre une série d'aspects originaux en rapport étroit avec les conditions du climat, du sol et du relief. Ces formations végétales constituent un élément important du milieu physique, d'ailleurs elle n'est que le reflet de la qualité du sol et bien sur du climat (Benabdeli, 1996). Cette végétation est pratiquement inexistante sur les zones marneuses, généralement peu dense sur les reliefs (beaucoup de peuplements dégradés ne jouent d'ailleurs que très imparfaitement leur rôle protecteur). Les facteurs socio-économiques qui contribuent largement à l'accélération du processus de colonisation des sols favorisant l'accélération des écoulements vu les changements climatiques comme la sécheresse combiné par l'action anthropozoïque.

La végétation forestière du Tell oranais est représentée par les séries d'essences arborescentes principales : *Tetraclinis articulata*, *Quercus ilex*, *Quercus suber*, *Quercus faginea*, *Quercus coccifera*, *Pinus halepensis*, *Pinus pinaster* et *Eucalyptus* sp.

Une strate arbustive et buissonnante caractérisée par une gamme variée d'espèces offrant un large spectre d'adaptation aux conditions du milieu et occupant le sous étage de la strate arborescente notamment: *Pistacia lentiscus*, *Quercus coccifera*, *Juniperus phoenicea*, *Olea europea*, *Juniperus oxycedrus*, *Laurus nobilis*, *Prunus avium*, *Arbutus unedo*, *Erica arborea*, *Phyllyrea angustifolia*, *Rhus pentaphylla*, *Pistacia terebinthus*, *Ilex aquifolium*, *Ceratonia siliqua*, *Ficus carica*, *Atriplex halimus* et *Zizyphus lotus*.

La pression anthropozoïque agit sur les formations précitées et permet aux formations dégradées de s'imposer et d'imprimer leur physionomie à tout le paysage végétal. La transition est aussi perturbée par les reboisements massifs de Pin d'Alep qui occupent une surface non négligeable dans l'aire du genévrier et du Thuya.

La modification régressive du tapis végétal dans cette région d'Algérie favorisé par la sécheresse, laisse toujours des terres soumises aux problèmes d'érosion. Sur des versants tourmentés et des pentes assez raides se trouvent ainsi réunies les conditions les plus propices aux processus érosifs.



(Source : Agence Nationale de l'aménagement du Territoire, 2000)

Figure 16 : Carte d'occupation des sols dans le Tell oranais

2.1.5.1- Groupements des dunes maritimes

Dans le littoral méditerranéen, on trouve des formations de genévrier oxycèdre et genévrier rouge, ces espèces restent liées aux substrats sableux des dunes.

Au niveau des côtes, la végétation se répartit sur deux types de milieu :

- les plages et les cordons dunaires occupés par des groupements psammohalophiles ;
- Dans les zones les plus stabilisées apparaît *Retama monosperma* qui prépare l'implantation des espèces arborescentes. On peut ainsi observer de très beaux peuplements de *Retama* près de la plage de Mostaganem et de l'Oued Sidi Abdellah de Ghazaouet (Alcaraz, 1977). On retrouve aussi trois espèces psammo-halophiles endémiques du littoral oranais : *Anthemis chrysantha*, *Ononis antenata* et *Corynephorus articulatus*.

La végétation non halophile s'installe juste après la ceinture de végétation psammo-halophile. Elle est souvent dominée par les espèces arborescentes. Le thuya étant l'espèce la plus répandue. Il peut se mélanger à d'autres essences grâce à sa capacité de s'accommoder à différents substrats.

2.1.5.2- Végétation steppique

Les steppes constituent une vaste étendue couverte d'une végétation basse et très ouverte on distingue : *Stipa tenacissima*, *Lygeum spartum*, *Artemisia herba alba*, *Helianthemum hirtum*, *Salsola vermiculata*, *Stipa parviflora* et *Artrophytum scoparium*, etc. ces espèces apparaissent surtout dans les hauts plateaux steppiques, tels que Mascara, Sidi Bel Abbes et El Aricha (figure 16).

2.1.5.3- Les cultures pérennes et les reboisements

Avec les travaux de valorisation des terres est surtout celles des montagnes dans le Tell oranais la population trouve un gain d'intérêt pour l'arboriculture fruitière rustiques (olivier, amandier, figuier) et le vignoble.

La grande partie des reboisements a été réalisée dans la région, qui a subi une dégradation intense et générale par les différentes causes anthropozoïques (activités humaines, surpâturage, incendies et manque de travaux d'entretien), le Pin d'Alep et les Eucalyptus qui sont introduits dans la région dans le but de stabiliser les terrains, maintenir les berges des Oueds et pour varier les reboisements. Ces derniers, s'ils réussissent relativement bien, ne sont suivis d'aucune sylviculture. On note aussi la plantation d'arbustes fourragers tels que la luzerne, les Atriplex et le Pistachier dans les hauts plateaux.

2.1.5.4- Les cultures annuelles

Sur l'ensemble de la région du Tell oranais, la céréaliculture extensive la culture la plus pratiquée. C'est une agriculture extensive et semi intensive de céréales de légumineuses et de cultures maraichères pratiquées en intercalaire dans les parcelles d'arbres fruitiers. Par ordre d'importance on distingue les petits pois, les pois chiches, les fèves, l'oignon et la pomme de terre. Elles occupent les dépressions et les zones de plaines, mais aussi fortement présentent dans les collines et sur les piémonts des versants. Baahmed (2015) mentionne que la céréaliculture est dominante dans cette région (figure 16).

2.1.6- Les terrains nus

Il s'agit des terres entièrement dénudées et non cultivées. Ces terres existent un peu partout dans la région du Tell oranais, à cause du degré de manifestation de l'érosion hydrique (phénomène de ravinement) où les terres qui font l'objet de litige familial, les zones ensablées et les zones caillouteuses. Du fait de l'absence d'un couvert végétal permanent, au lieu de stagner et de s'infiltrer, les eaux se sont mises à ruisseler et à entraîner avec elles la terre et ses fertilisants

naturels, en particulier le limon, l'argile et les matières organiques qui sont également des liants des sols fragiles.

Conclusion

La région d'étude fait partie des régions semi-arides méditerranéennes, sa structure géologique et lithologique est très sensible à l'érosion hydrique. Cette sensibilité est aggravée par la conjonction de différents facteurs : Les écarts climatiques interannuels et intersaisons, les variantes thermiques, l'agressivité des pluies, la raideur du relief, le ruissellement provenant des versants et la faiblesse du couvert végétal.

La région Nord- Ouest présente une diversité de reliefs, marquée par l'existence de plusieurs plaines et plateaux avec de grandes potentialités agro-pédologiques permettant une intensification de l'agriculture dans cette région.

Le réseau hydrographique assez dense a permis la réalisation d'une infrastructure hydraulique importante mais menacée en permanence par l'érosion hydrique (envasement, inondation, eutrophisation, pollution...).

CHAPITRE III
ETUDE CLIMATIQUE

3- Climat

Le climat est l'ensemble des phénomènes météorologiques (les températures, la pluviométrie, la pression atmosphérique, les vents, l'évapotranspiration, l'humidité) qui caractérisent l'état moyen de l'atmosphère et son évolution en un lieu donné. Il est déterminé par la situation géographique et par la circulation atmosphérique. Le climat est un facteur du milieu naturel qui détermine le potentiel agricole d'une région. Par ces composantes, il influe sur le développement des plantes, la formation et l'évolution des sols, son action est souvent défavorable dans la mesure où il peut être à l'origine de la dégradation du milieu.

Le Tell oranais est soumis à un climat du type méditerranéen caractérisé par des pluies concentrées durant la période froide de l'année, la sécheresse coïncide avec les mois chauds, c'est pourquoi on le qualifie de climat xérothermique (Greco, 1966), La hauteur des pluies augmente de l'Ouest à l'Est et diminue du Nord au Sud. L'hiver est très pluvieux et froid : les pluies tombent durant la période allant du mois d'Octobre au mois de Mai. De Juin à Septembre il ne tombe que quelques rares et courtes averses, par contre, l'été est sec avec de fortes chaleurs surtout lorsque le sirocco souffle, le vent qui domine en hiver est celui du Nord-Ouest ; en été, la direction des courants aériens est fortement variable, c'est durant cette saison que le sirocco, vent du Sud-Est, fait sentir sa pernicieuse influence, en été des rosées abondantes suppléent à l'absence des pluies. La neige est rare et surtout sur le littoral.

3.1- Analyse du climat

Le climat du Tell oranais est de type méditerranéen au Nord et englobe principalement le littoral. Entre l'atlas tellien et l'atlas saharien où culminent les hauts plateaux, le climat est de type continental avec des étés chauds et secs et des hivers humides et frais à froid. Ce climat est caractérisé par une nette opposition entre une saison sèche et humide faisant succéder une période de précipitations intenses et abondantes à une longue période de chaleur et de sécheresse absolues.

Le climat qui est caractérisé par des sécheresses répétées et de pluviométries irrégulières dans le temps et l'espace. En conséquence, la pression anthropique, la réduction du couvert végétal et l'activité agricole réduite dans les zones côtières liées à la salinisation des eaux souterraines (Meddi et al., 2014), l'utilisation des engrais chimiques dans l'agriculture, favorise la concentration de nitrates dans la nappe phréatique (Bahri et Saibi, 2010).

Les pluies sont caractérisées par une irrégularité spatio-temporelle nettement observée, elle s'exprime par des oscillations d'une année à l'autre et d'une station à l'autre,

L'irrégularité qui caractérise les pluies nous a amené à collecter un maximum de données sur les quantités de pluie dans différentes stations et sur plusieurs années dans notre région d'étude. En

effet, nous avons rassemblé les totaux moyens journaliers, mensuels et annuels de pluie, de 21 stations pluviométriques pour une période de 30 ans.

3.1.1- Pluviométrie

La pluie est l'élément causal de l'érosion, il intervient dans les processus érosifs par son intensité, sa fréquence et sa hauteur, Djebaili (1978) définit la pluviosité comme étant le facteur primordial qui permet de déterminer le type de climat. En effet, celle-ci conditionne le maintien et la répartition du couvert végétal d'une part, et la dégradation du milieu naturel par le phénomène d'érosion d'autre part. Le Tell oranais est marqué par des conditions climatiques contraignantes où les pluies saisonnières sont très contrastées et irrégulières. Les pluies agressives exceptionnelles qui s'abattent sur la région en déclenchant le ravinement et le glissement de terrains, charrient d'énormes quantités de sédiments vers les réservoirs d'eau (Roose, 2004). L'analyse des pluviométries est réalisée à travers l'étude du régime annuel, mensuel, saisonnier et torrentiel.

3.1.1.1- Pluviométrie annuelle

La pluviométrie moyenne annuelle des stations du Tell oranais varie entre 399 mm (Ain Fares) et un peu plus de 231 mm (El Aricha), (figure 17).

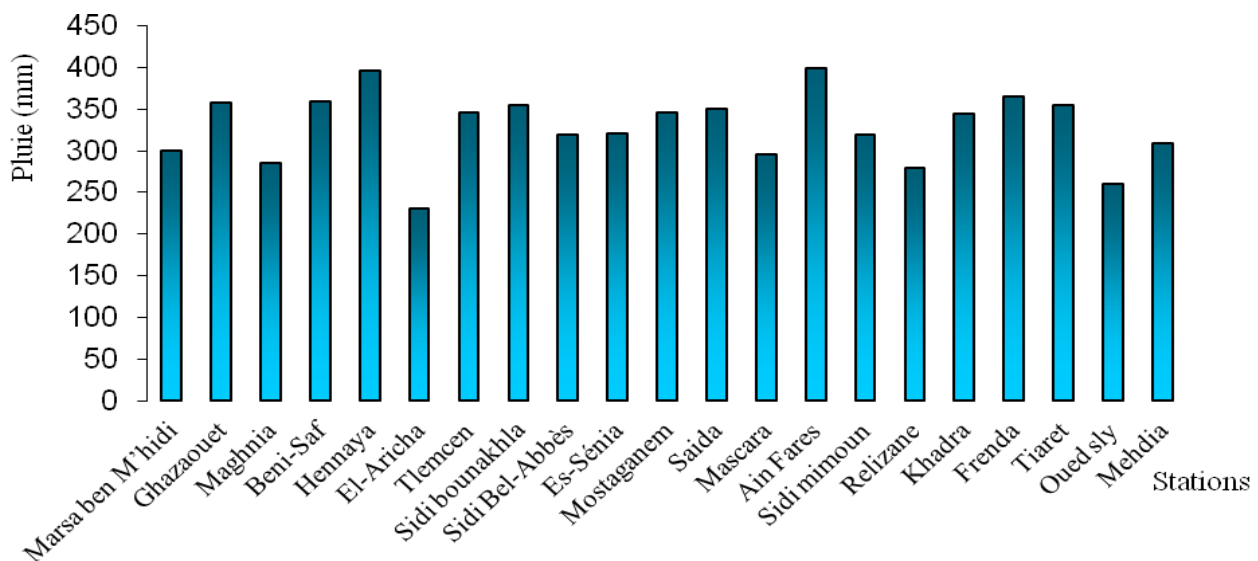


Figure 17 : Pluviométrie moyenne annuelle des stations du Tell oranais (1980-2011)

Ces variations de la pluviométrie sont dues au positionnement géographique des stations et l'éloignement par rapport à la mer. Nous remarquons aussi, que le Tell oranais reçoit moins de pluies à cause de la péninsule ibérique et du Rif Marocain qui les mettent en position d'abri pluviométrique. Cette figure montre bien les tendances pluviométriques de la région étudiée, Elle illustre bien l'influence de trois facteurs sur la répartition spatiale des pluviométries à savoir : l'altitude, la longitude et la latitude. Les pluies croissent du Sud au Nord et de l'Ouest à l'Est, L'augmentation des pluies proche du littoral, est liée aux masses d'air humide venues du Nord

(Nord-Ouest, Nord et Nord-Est). Sur le Nord-Est de la région étudiée, les pluies moyennes annuelles atteignent les 400 mm, Ces pluies diminuent fortement vers le Sud où on enregistre des hauteurs de l'ordre de 231mm dont le rapport est de l'ordre de 2 fois. La figure 18 met en évidence la répartition spatiale de la pluviométrie dans l'Ouest algérien. On observe des tranches pluviométriques relativement élevées sur la partie Ouest du Dahra, les massifs de l'Ouarsenis, les monts de Tiaret et ceux de Tlemcen.

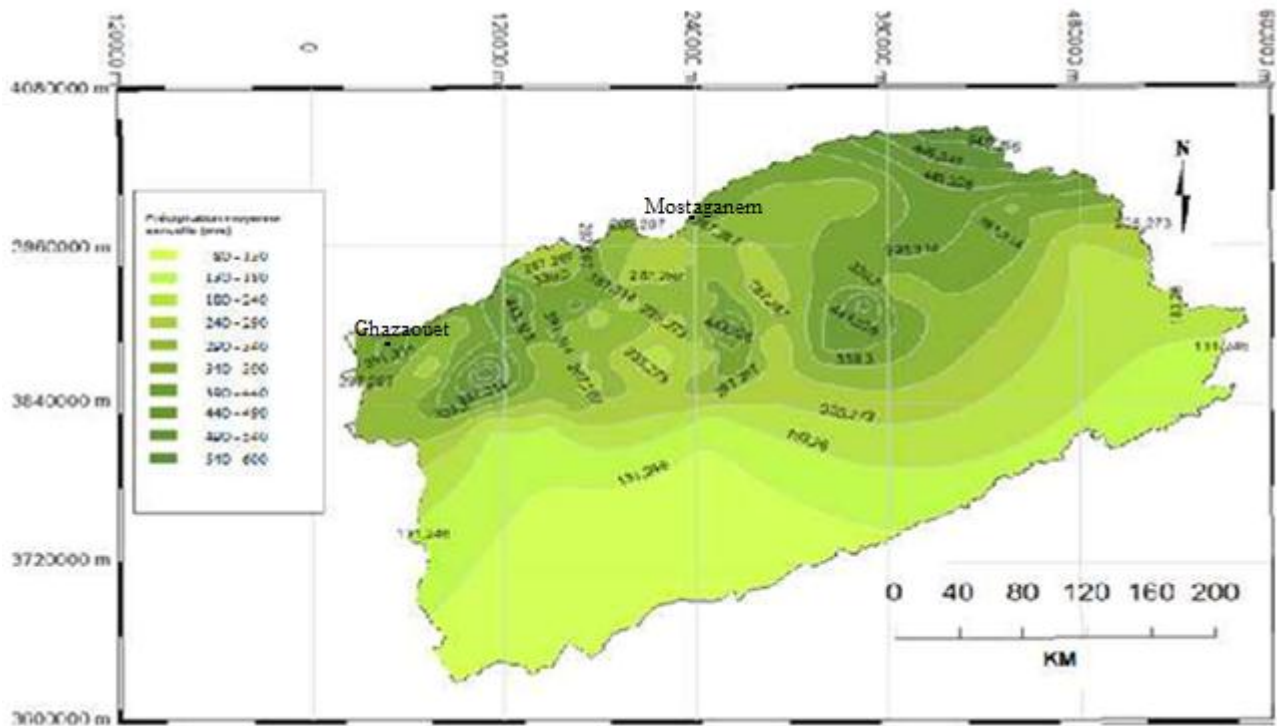


Figure 18 : Carte pluviométrique du Tell oranais (1986/2005) source (Mehaiguen et *al.*, 2013)

Les pluies annuelles augmentent du Sud au Nord et de l'Ouest à l'Est. La partie littorale et les sommets qui lui sont proches reçoivent les pluies les plus importantes. Les régions intérieures reçoivent moins de pluie du fait de l'appauvrissement des masses nuageuses de leur humidité au fur et à mesure qu'elles se dirigent vers l'intérieur.

3.1.1.2- Pluviométrie mensuelle

Les pluviométries moyennes mensuelles des stations du Tell oranais sont concentrées durant la période allant d'Octobre à Mai. La quantité de pluies est particulièrement élevée durant les mois de Novembre à Mars, En été (Juin, Juillet et Août) la pluviométrie est très faible (tableau 9).

Tableau 9 : Pluviométrie moyenne mensuelle (mm) des stations du Tell oranais

Stations	S	O	N	D	J	F	Mrs	A	M	J	JT	AT	P moy
Marsa ben M'hidi	11,37	22,83	53,2	29,21	44,69	49,15	37,03	26,14	18,51	5,09	1,19	1,63	300,04
Ghazaouet	13,1	31,0	77,6	38,1	44,3	48,6	39,7	28,3	21,7	3,4	6,0	5,5	357,30
Maghnia	15,7	24,5	39,1	33,0	38,9	34,5	41,2	24,1	22,3	2,8	1,6	7,7	285,40
Beni-Saf	15,05	25,91	57,94	40,36	51,05	55,57	39,77	35,70	25,68	8,12	2,70	1,66	359,51
Hennaya	17,66	30,28	50,31	42,53	49,41	53,97	55,73	48,90	32,74	5,74	2,09	6,68	396,04
El-Aricha	22,6	19,8	21,9	13,6	25,2	18,5	39,77	29,1	20,02	6,6	3,8	10,4	231,30
Tlemcen	15,2	27,6	53,9	46,3	49,8	41,4	44,2	26,2	24,0	2,2	8,0	6,7	345,50
Sidi bounakhla	27,48	26,50	44,61	45,66	48,04	54,04	35,52	32,59	28,02	7,69	1,48	2,79	354,41
Sidi Bel-Abbès	16,92	28,74	42,43	36,95	38,86	44,73	41,78	31,8	20,31	8,52	3,78	4,24	319,06
Es-Sénia	13,17	25,71	58,1	40,85	38,2	47,85	40,69	24,89	24,34	3,17	0,59	2,84	320,40
Mostaganem	16,17	28,82	65,41	53,32	45,99	41,52	27,2	34,77	26,01	3,05	1,06	2,83	346,15
Saida	22,1	37,9	40,4	40,3	37,8	38,1	33,4	35,0	32,6	13,1	6,1	12,9	349,70
Mascara	17,8	28,6	51,5	45,3	31,0	31,0	23,3	27,8	27,2	2,9	1,0	8,6	296,00
Ain Fares	19,62	30,42	61,68	56,07	52,39	43,5	45,78	44,63	32,66	4,89	2,03	5,4	399,07
Sidi mimoun	17,81	24,96	35,58	35,29	37,46	43,62	43,33	28,59	29,76	10,19	5,74	6,98	319,31
Relizane	14,82	24,68	41,14	35,97	33,99	35,14	25,39	30,00	21,15	4,25	1,55	11,82	279,92
Khadra	16,93	34,23	65,18	52,34	38,43	41,34	30,38	36,68	22,83	3,34	0,92	1,52	344,12
Frenda	33,22	29,26	40,4	45,9	47,36	40,68	26,65	37,25	29,44	18,35	6,32	10,35	365,24
Tiaret	29,3	31,3	40,1	48,3	42,1	34,3	24,0	45,0	30,0	9,8	4,1	16,0	354,30
Oued sly	9,09	20,34	40,54	43,5	30,88	41,37	24,57	27,55	16,62	2,57	1,02	2,7	260,75
Mehdia	22,17	30,31	35,5	32,75	34,17	35,49	27,22	38,65	26,36	9,99	5,96	10,37	308,94

ANRH (1980-2011)

3.1.1.3- Pluviométrie saisonnière

On observe une concentration des averses sur une durée assez courte de l'année. Le tableau 10 indique non seulement un régime à deux saisons très contrastées mais, la position des minima est également typique de la variété continentale du climat méditerranéen.

Tableau 10 : Pluviométrie moyenne saisonnière

Stations	Automne	Hiver	Printemps	Eté	Type
Marsa ben M'hidi	87,4	123,05	81,68	7,91	HAPE
Ghazaouet	121,7	131	89,70	14,90	HAPE
Maghnia	79,3	106,4	87,60	12,10	HPAE
Beni-Saf	98,90	146,98	101,15	12,48	HPAE
Hennaya	98,25	145,91	137,37	14,51	HPAE
El-Aricha	64,3	57,3	88,89	20,80	PAHE
Tlemcen	96,7	137,5	94,4	16,9	HAPE
Sidi bounakhla	98,59	147,74	96,13	11,96	HAPE
Sidi Bel-Abbès	88,09	120,54	93,89	16,54	HPAE
Es-Sénia	96,98	126,9	89,92	6,60	HAPE
Mostaganem	110,4	140,83	87,98	6,94	HAPE
Saida	100,4	116,20	101	32,1	HAPE
Mascara	97,9	107,30	78,3	12,5	HAPE
Ain Fares	11,72	151,96	123,07	12,32	HPAE
Sidi mimoun	78,35	116,37	101,68	22,91	HPAE
Relizane	80,64	105,10	76,54	17,62	HAPE
Khadra	116,34	132,11	89,89	5,78	HAPE
Frenda	102,88	133,94	93,14	35,02	HAPE
Tiaret	100,7	124,70	99	29,9	HAPE
Oued sly	69,97	115,75	68,74	6,29	HAPE
Mehdia	87,98	102,41	92,23	26,32	HPAE

Le régime saisonnier nous renseigne sur la hauteur des pluies en chaque saison, il consiste à regrouper les mois de l'année qui se ressemblent le plus, du point de vue pluviométrie et température. Ensuite, on procède à un arrangement des saisons par ordre décroissant de

pluviométrie, ce qui a permis d’obtenir deux périodes : une période humide qui commence en octobre et prend fin en avril et une période sèche qui s’étale de mai à septembre.

La distribution saisonnière des pluviométries (figure 19), montre que l’hiver est la saison la plus humide ; avec une sécheresse en période d’été, Toutefois nous remarquons une période relativement pluvieuse durant l’automne, l’hiver et le printemps et une saison sèche durant l’été.

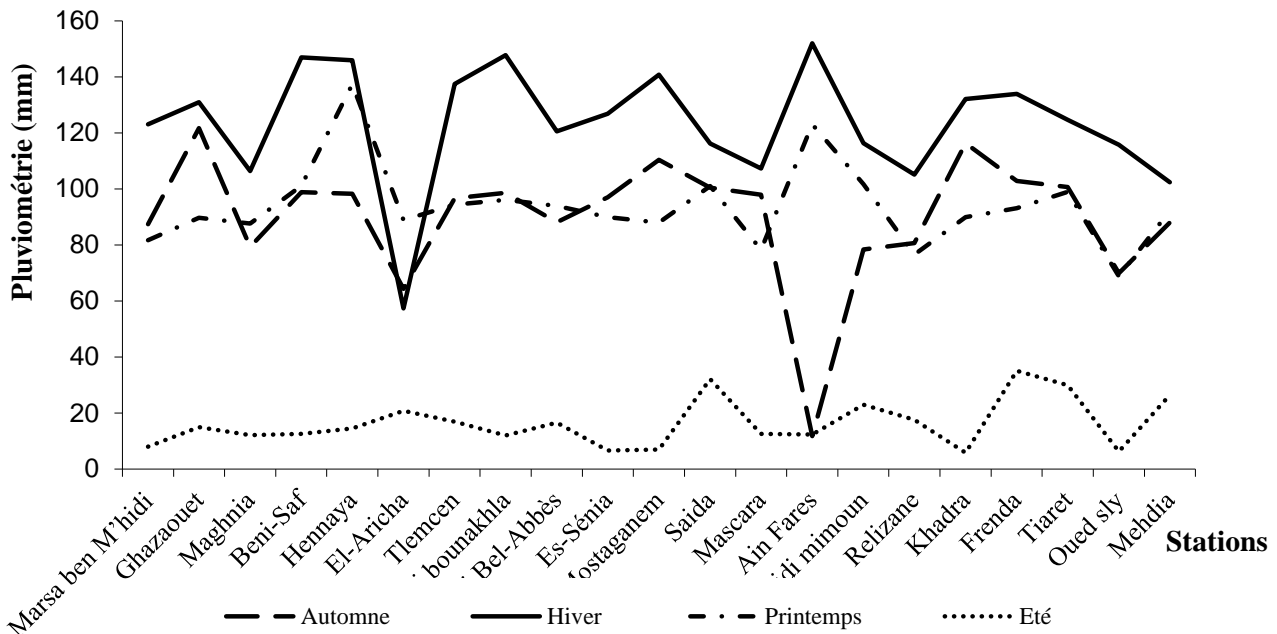


Figure 19 : Pluviométrie moyenne saisonnière des stations du Tell oranais

Le régime saisonnier de pluies est de type HAPE pour les stations : Marsa Ben M’hidi, Ghazaouet, Tlemcen, Sidi Bounakhla, Es-Sénia, Mostaganem, Saida, Mascara, Relizane, Khadra, Frenda, Tiaret et Oued sly. Pour les stations de Maghnia, Beni-Saf, Hennaya, Sidi Bel Abbes, Ain Fares, Sidi Mimoun et Mehdia, le régime est de type HPAE. La station d’El Aricha a un régime de type PAHE (tableau 10).

3.1.1.4- Pluviométrie torrentielle

La pluviométrie torrentielle supérieure à 20 mm/ 24 h varient entre 1,95 % pour Maghnia et 10,99 % pour Ghazaouet. Ces pluies torrentielles sont concentrées dans les tranches 20-30 mm et 30-40 mm et surviennent généralement durant la période de Novembre à Mai. Elles sont concentrées sur un nombre restreint de jours, la moitié des pluies annuelles tombe en 25 à 30 jours pendant la période allant de Novembre à Février (tableau 11).

Tableau 11 : Fréquence en (%) des classes de hauteurs de pluies dans les stations du Tell oranais

Stations	Classes de pluviométrie en mm						Pluies torrentielles > à 20 mm
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	+ de 50	
Ghazaouet	76,87	12,13	7,51	2,90	0	0,58	10,99
Mostaganem	82,32	11,11	4,54	1,51	0	1,01	7,06
Tlemcen	74,33	10,16	4,60	3,20	1,60	0	9,40
Maghnia	87,43	9,67	0,49	0,97	0	0,49	1,95
Mascara	87,32	8,92	1,87	1,40	0,47	0	3,74
Sidi Bel Abbès	87,38	8,56	3,60	0	0	0	3,60
Saida	88,01	7,87	2,62	0,74	0,74	0	4,10
Tiaret	91,09	7,26	1,98	00	0	0	1,98

Les diverses études réalisées par Kouri (1993), Gomer (1994) et Touaibia (2000) sur le processus de ravinement et les débits liquides et solides dans le bassin versant de l'Oued Mina, ont démontré que toutes les pluies journalières supérieure à 20 mm sont des pluies torrentielles et auraient provoqué un ruissellement qui transporte les éléments des sols en suspension vers les retenues collinaires. Ces pertes en sol peuvent atteindre environ 21,49 t/ha/an.

3.1.2- Températures

La température est le second facteur constitutif du climat. Les écarts thermiques provoquent la désagrégation des roches ayant pour conséquence le développement des sols. Elle augmente l'évaporation dans les sols et agit négativement sur le développement des plantes par la forte transpiration.

L'analyse des données climatiques montre que la moyenne des maximums du mois le plus chaud (M) du Tell oranais, varie entre 29 °C en Août (Marsa Ben M'hidi) et 37,77 °C en juillet (Oued sly). La température minimale du mois le plus froid est enregistrée en mois de janvier pour la station d'El Aricha avec -2,2 °C.

Selon Debrach (1953), la grande différence entre la température moyenne en été et celle de l'hiver montre l'importance de la chaleur estivale, et divise le climat en 4 types :

Climat insulaire $M-m < 15\text{ °C}$

Climat littoral $15\text{ C} < M-m < 23\text{ °C}$

Climat semi-continental $25\text{ C} < M-m < 35\text{ °C}$

Climat continental $M-m > 35\text{ °C}$

D'après le tableau 11, les stations du Tell oranais appartiennent au climat semi continental, à l'exception des stations de Marsa ben M'hidi, Ghazaouet, Beni-Saf, Es-Sénia et Mostaganem à climat littoral. Les autres stations appartiennent au climat semi-continental.

Tableau 12 : Moyenne de températures du mois le plus chaud « M », du mois le plus froid « m », Quotients pluviothermiques d'Emberger (Q2) et de Stewart (Q3) du Tell oranais.

Stations	m (°C)	mois	M (°C)	mois	Q2	Q3
Marsa Ben M'hidi	7	Janvier	29,0	Août	46,84	46,78
Ghazaouet	9,1	Janvier	29,8	Août	58,99	59,20
Maghnia	4,3	Janvier	34,6	Août	32,19	32,31
Beni-Saf	9	Janvier	29,6	Juillet	59,67	59,86
Hennaya	5,1	janvier	33,3	Août	48,04	48,17
El-Aricha	-2,2	janvier	32,72	Août	22,97	22,72
Tlemcen	6,1	Janvier	33	Août	43,88	44,05
Sidi Bounakhla	7,8	Janvier	29,9	Juin	54,92	55,01
Sidi Bel-Abbès	2,7	Janvier	35,1	Août	33,72	33,78
Es-Sénia	5,05	Janvier	30,3	Août	43,63	43,52
Mostaganem	6,2	Février	31,6	Août	46,69	46,74
Saida	3,4	Janvier	35,5	Juillet	37,23	37,37
Mascara	3,3	Février	35,1	Août	31,84	31,93
Ain Fares	2,1	Janvier	35,7	Août	40,66	40,73
Sidi Mimoun	3,3	Janvier	36,5	Août	32,82	32,99
Relizane	5	Janvier	29,72	Août	38,98	38,84
Khadra	5,6	Janvier	32,07	Août	44,52	44,59
Frenda	3,01	Janvier	33,7	Juillet	40,83	40,82
Tiaret	1,4	Janvier	34,8	Juillet	36,33	36,38
Oued Sly	6,48	Janvier	37,77	Juillet	28,22	28,58
Mehdia	0,4	Janvier	34,6	Juillet	31,08	30,98

3.1.3- Humidité relative

Il s'agit du pourcentage d'humidité, ou de vapeur d'eau, contenu dans l'air par rapport à la quantité maximum que peut contenir cet air avant de se condenser, c'est-à-dire avant de se transformer en gouttelettes d'eau. L'humidité est inversement liée à la température de l'air autrement dit elle est maximale pendant les mois les plus froids d'hiver et est minimale pendant les mois d'été

Tableau 13 : Humidité relative moyenne (%) de quelques stations du Tell oranais

Stations	Humidité	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jllet	Août	Sep	Oct	Nov	Dec	Année
Mostaganem	H moy	78	78	74	70	71	68	69	69	72	75	78	77	73
Mascara	H moy	74	72	69	65	62	52	46	49	58	64	73	76	63
Tiaret	H moy	80	75	68	67	62	45	38	42	55	62	74	80	62
Ghazaouet	H moy	70	72	73	69	65	71	69	71	72	74	65	70	70
Tlemcen	H moy	75	75	73	68	66	61	59	62	67	72	74	75	69
Saida	H moy	70	66	62	61	58	46	41	43	55	60	67	70	58
Maghnia	H moy	72	71	70	65	62	53	50	53	62	68	73	73	64
El Aricha	H moy	69	58	50	48	41	31	24	27	40	49	62	70	47

ONM 1980-2011

Le tableau 13, montre que l'humidité est élevée pendant les mois de décembre et janvier (80 % pour la station de Tiaret) et est minimale jusqu'à 24 % au mois de juillet pour la station d'El Aricha. Ce qui augmente l'évapotranspiration. L'humidité agit comme un facteur de compensation quand les pluies sont absentes, on remarque que l'humidité moyenne annuelle des stations du Tell oranais varie entre 47 % (station d'El Aricha) et 73 % (station de Mostaganem).

L'humidité relative joue un rôle important en matière d'apport de vapeur d'eau pour le sol et la végétation. Elle atténue l'effet des fortes températures et peut combler en partie le déficit hydrique accusé, et ceci après les pertes considérables d'eau dues à l'évapotranspiration.

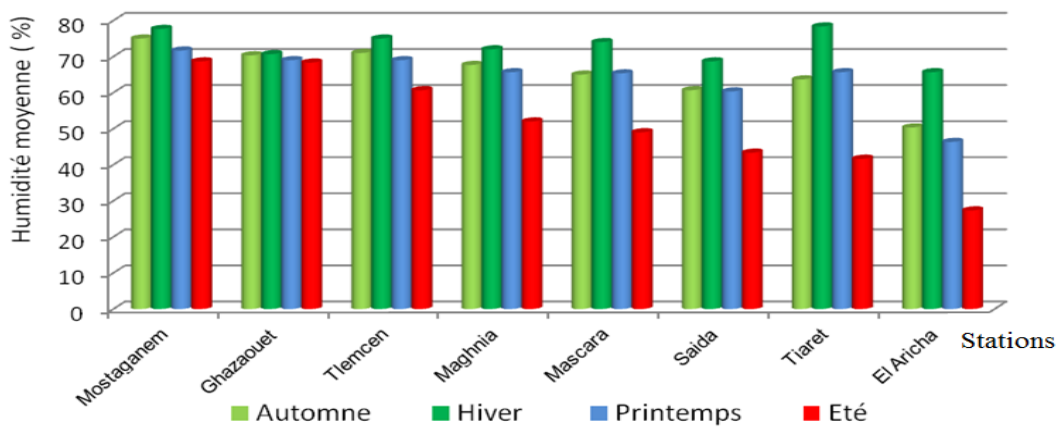


Figure 20 : Humidité moyenne saisonnière (%) dans quelques stations du Tell oranais

La figure 20 fait ressortir les points suivants :

- Les stations du littoral (Mostaganem et Ghazaouet) sont caractérisées par un taux d'humidité de l'air élevé (68 % à 75 %) durant toute l'année.
- Durant l'hiver, l'humidité est élevée (65 % à 78 %) pour l'ensemble des stations.
- Pour les stations de l'intérieur, l'humidité de l'air diminue fortement en été (25 % à 40 %) pour El Ariche, Tiaret et Saida.

3.1.4- Vent

D'après Seltzer (1946), le vent est considéré comme l'élément le plus caractéristique du climat méditerranéen, il contribue à la dégradation des sols et augmente le stress hydrique des végétaux, Il est caractérisé par sa direction, sa force et sa fréquence. La vitesse moyenne des vents dans le Tell oranais varie d'une zone à d'autre, dans les stations Mostaganem, Mascara, Sidi Bel Abbas, Ghazaouet et Tlemcen, la vitesse ne dépasse pas 3 m/s, alors que dans les stations de Maghnia, Saida et Tiaret, cette dernière varie de 4 à 9 m/s (figure 21).

Le vent moyen souffle durant toute l'année mais il souffle fréquemment dans des directions diverses (figure 22) et à différentes intensités en fonction des saisons. Les vents du secteur Ouest et Sud-Ouest sont dominants tout au long de l'année, En hiver les vents d'Ouest et Nord-Ouest secs et froids dominent, mais en été, les vents d'Est soufflent le plus. Les vents humides qui viennent de la mer méditerranée soufflent surtout sur les stations du littoral (Mostaganem, Oran, Beni Saf et Ghazaouet). Les vents chauds et secs viennent directement du Sud, Sud-Est ou l'Est.

Les vents sont de direction Ouest-Nord Ouest en hiver alors que les vents d’Est, responsables de fortes pluies sont rares en cette saison. Les vents du Nord-Est sont fréquents en Eté. Ils génèrent des pluies faibles (Meddi, 2009).

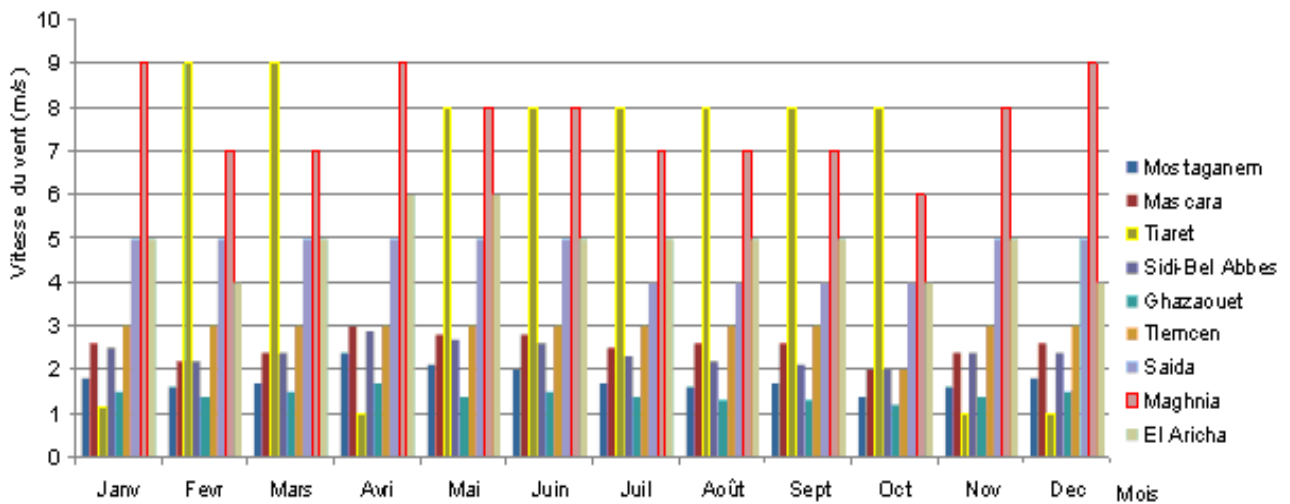


Figure 21 : Moyenne mensuelle de la vitesse du vent (m/s), (1980-2011)

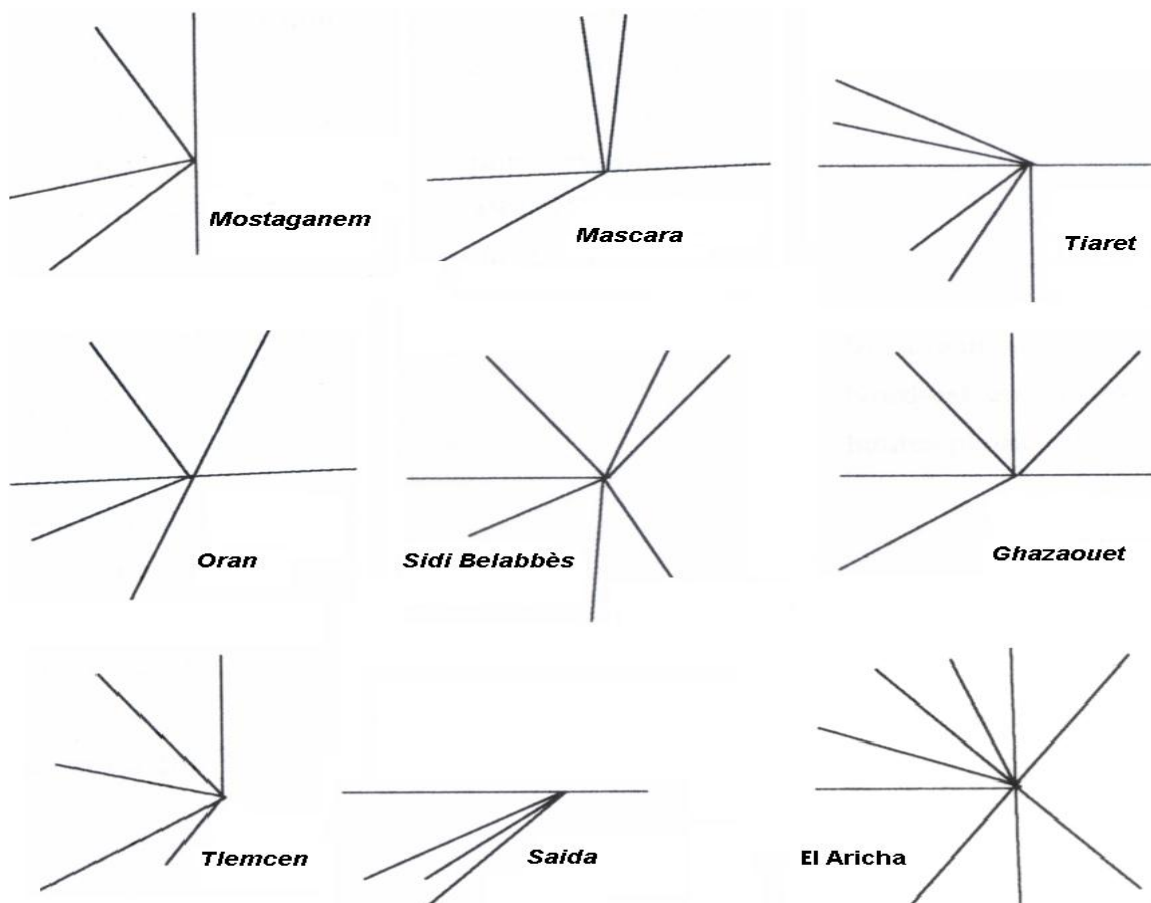


Figure 22 : Rose des vents annuels de quelques stations du Tell oranais

Le sirocco est un vent chaud et sec, chargé de poussières, il prend naissance au Sahara et il est très fréquent en été. La région du Tell oranais n'échappe pas au sirocco surtout en été. C'est un vent très desséchant, il provoque de fortes évaporations et expose le sol à une grande érosion éolienne.

3.1.5- Synthèse bioclimatique

3.1.5.1- Diagramme Ombrothermique de Bagnouls et Gausсен

Le diagramme met en évidence la période de sécheresse et son intensité dans une région donnée, Bagnouls et Gausсен (1953) considèrent qu'un mois est sec lorsque le total des pluviométries moyennes exprimé en (mm) est inférieur ou égal au double de la température moyenne en degré Celsius ($P \leq 2T$). Ces auteurs préconisent pour la détermination de la période sèche de tracer un diagramme sur lequel la température est portée à une double échelle de celle des pluies. La durée de cette période sèche est matérialisée par la surface de croisement, où la courbe thermique passe au-dessus de la courbe pluviométrique.

La période sèche des stations du Tell oranais dure entre 6 à 7 mois, pour la station de Mostaganem elle s'étale sur une période de 6 mois (Avril à Octobre) alors que pour El Aricha, la période sèche s'étale sur une période proche de 7 mois (Avril à fin d'Octobre), (figure 23 et figure A en annexe).

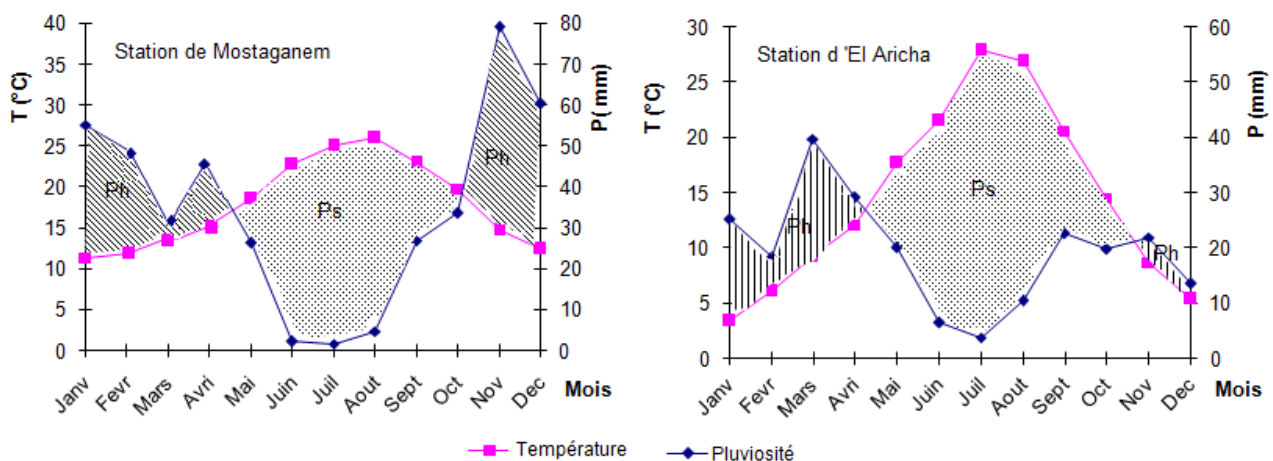


Figure 23 : Diagramme Ombrothermique des stations de Mostaganem et d'El Aricha

3.1.5.2- Climagramme d'Emberger (1955)

Emberger a cherché une expression synthétique du climat méditerranéen capable de rendre compte de la sécheresse, le quotient pluviothermique d'Emberger (Q_2), qui a une valeur écologique différente suivant les températures minimales.

Le climagramme est utilisé en climat méditerranéen pour la délimitation des aires occupées par diverses associations végétales. Il prend en considération les pluviométries annuelles et l'écart thermique entre le maximum et le minimum des températures au court de l'année.

$$Q_2 = \frac{2000 P}{M^2 - m^2}$$

Q2 : Quotient pluviothermique d'Emberger

P : Pluviométrie moyenne annuelle en mm

M : Moyenne des températures maximales du mois le plus chaud (en degré kelvin)

m : moyenne des températures minimales du mois le plus froid (en degré kelvin)

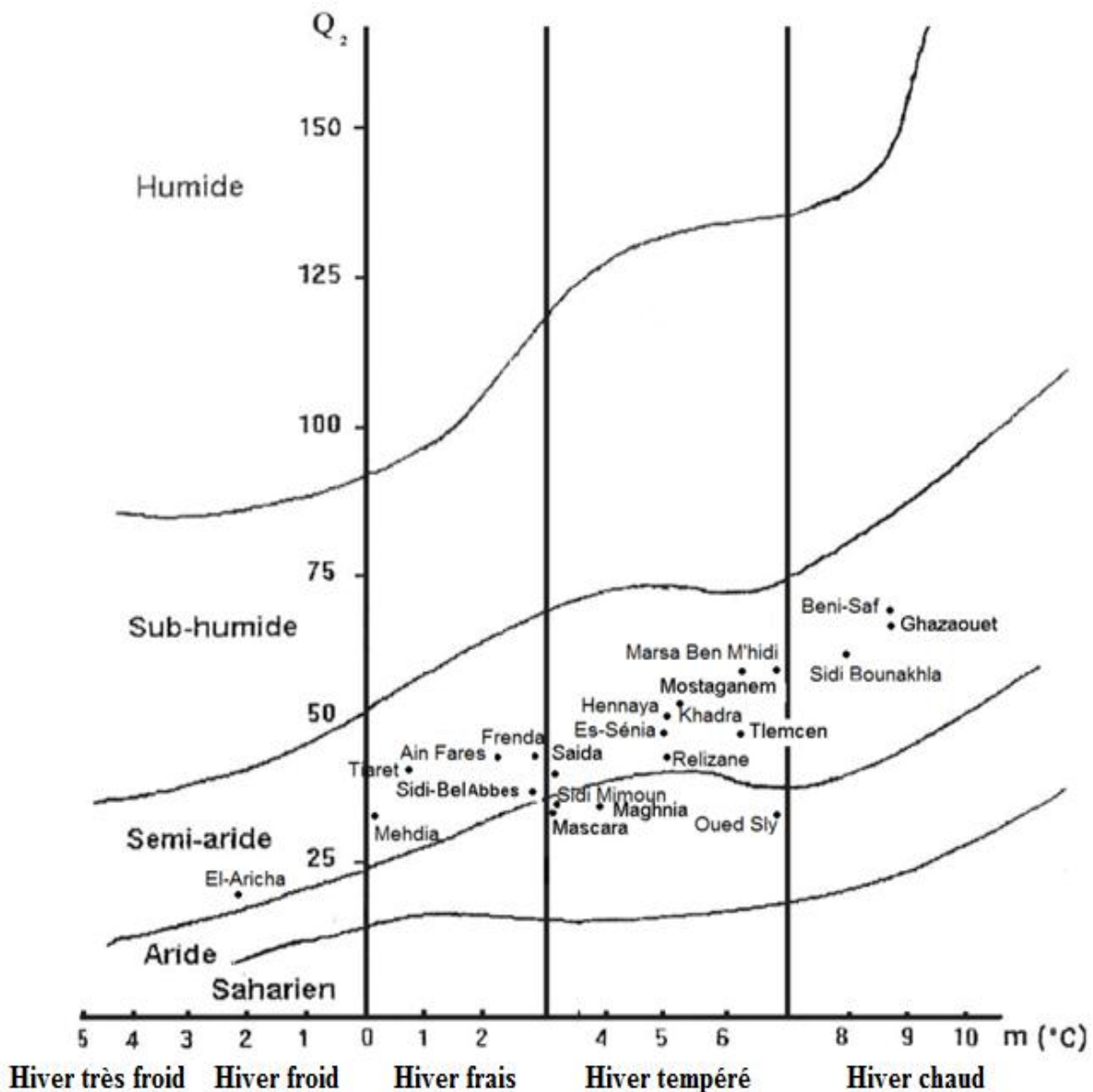


Figure 24 : Climagramme d'Emberger (1955)

En Algérie, (Stewart, 1969) a développé une reformulation du quotient pluviothermique (Emberger, 1955) de la manière suivante :

$$Q3 = 3,43 \times P/M-m$$

M et m : sont exprimés en degrés absolus K° (degrés Kelvin)

(Stewart, 1969) a montré que les valeurs du Q3 et Celle-ci peuvent être ramenées à une constante K dont la valeur pour l'Algérie et le Maroc est égale à 3,43. Il a montré que les valeurs du Q3 et celles obtenues par la formule du Q2 sont très peu différentes des valeurs calculées par la formule originale.

Nous avons calculé Q2 et Q3 selon les méthodes d'Emberger et Stewart pour les stations du Tell oranais et les résultats sont donnés dans le tableau 12.

Le quotient pluviothermique d'Emberger des stations du Tell oranais varie de 22,97 (El Aricha) à 59,67 (Beni-Saf). Cette différenciation est due aux facteurs climatiques (quantité de pluie et de la température et ces derniers varient avec la situation géographique des stations du Tell oranais (figure 24).

Selon le climagramme d'Emberger, la plupart des stations du Tell oranais appartiennent à l'étage bioclimatique semi-aride : à hiver tempéré (station de Mostaganem, Tlemcen, Es Sénia, Saida, Khadra, Relizane, Marsa Ben M'hidi, Hennaya), à hiver Chaud (station de Ghazaouet, Beni Saf et Sidi Bounakhla), à hiver frais (station de Frenda, Ain Fares, Tiaret, Mehdiya et Sidi Bel Abbes), à hiver froid on trouve la station d'El Aricha. Pour l'étage aride tempéré, on trouve les stations de Maghnia, de Mascara, d'Oued Sly et de Sidi Mimoun.

Conclusion

Le climat de la région d'étude est de type méditerranéen caractérisé par :

La concentration de pluies pendant la période froide (automne et hiver) ;

Une sécheresse apparente pendant les mois les plus chauds (été) ;

La synthèse bioclimatique montre que le climat de la région d'étude est de type semi-aride et aride avec une sécheresse qui dure près de sept mois ;

La pluviométrie moyenne annuelle maximale est de 400 mm (station d'Ain Fares), la moyenne minimale est de 231 mm (station d'El Aricha) ;

Les températures moyennes mensuelles présentent une valeur minimale en janvier avec -2,2 °C (station d'El-Aricha) et une valeur maximale en juillet avec 37,77 °C (station d'Oued Sly), et ce pour la période 1980-2011.

CHAPITRE IV
METHODOLOGIE DE TRAVAIL

4- Démarche méthodologique

L'érosion hydrique est sous l'influence de deux grands facteurs que sont l'érosivité des pluies et l'érodibilité des sols. Cette dernière dépend des caractéristiques physiques du sol. En utilisant des outils spatiaux, l'étude du phénomène érosif s'est avérée indispensable pour estimer le risque d'érosion des sols. La spatialisation de l'érosivité des pluies sur l'ensemble du Tell oranais ainsi que l'analyse des paramètres intrinsèques d'érodibilité des sols à l'échelle de deux zones test permettent la modélisation du processus érosif. L'évaluation du risque d'érosion du sol par une approche SIG/USLE à l'échelle de la partie occidentale du bassin versant de l'Oued Mina permet d'élaborer la carte de pertes en sol. Cette dernière permettra le choix des techniques de conservation adaptées.

La démarche méthodologique adoptée s'est basée sur la collecte, le traitement, l'analyse spatiale des données et la cartographie du risque d'érosion concernant quatre aspects :

- Etude de l'érosivité des pluies dans le Tell oranais ;
- Etude de l'érodibilité des sols à l'échelle de deux zones test ;
- Cartographie du risque d'érosion par approche (Télédétection/SIG/USLE) à l'échelle de la partie occidentale du bassin versant de l'Oued Mina dans notre région d'étude ;
- Application d'un modèle de lutte contre le ravinement.

4.1- Le premier aspect concerne l'étude de l'érosivité des pluies dans le Tell oranais

L'érosivité des pluies est parmi les facteurs les plus importants pour l'explication du phénomène de dégradation des sols. Afin d'évaluer le degré d'agressivité des pluies dans le Tell oranais, nous avons utilisé des indices d'érosivité des pluies.

4.1.1-Calcul des indices d'érosivité des pluies

La détermination des risques d'érosivité des pluies fait appel au calcul des indices d'érosivité des pluies à travers vingt et une (21) stations représentatives de l'ensemble du Tell oranais (tableau 14).

Le choix des stations s'est effectué de telle manière à couvrir les différents étages bioclimatiques présents dans le Tell oranais, ainsi que les différentes zones orographiques et compte tenu de la disponibilité des données pluviométriques au niveau de l'ANRH. Les stations sélectionnées disposent d'un nombre suffisant de mesures pour mener à bien cette étude.

Les indices d'érosivité des pluies calculés dans ces stations permettent de définir une relation spécifique reliant la quantité des pluies annuelles et l'agressivité climatique.

Pour mieux traiter l'érosivité des pluies et sa répartition spatiale, l'utilisation des séries de données de précipitations moyennes mensuelles et annuelles sur une période de 31 ans est fondamentale pour mieux traiter l'érosivité et la répartition spatiale des pluies ainsi que pour calculer les indices

comme celui de Fournier (1960), de Fournier modifié MFI (Arnoldus, 1980), de Rango et Arnoldus (1987) et les données journalières de pluies pour calculer l'indice de Deffontaines et De Montard (1968).

Par ailleurs, le calcul de ces indices permet d'analyser spatialement et temporellement les risques érosifs des pluies et la sélection du meilleur indice qui s'adapte aux conditions écologiques locales. Cette démarche nous permet d'établir les priorités d'intervention en matière de conservation des sols.

Tableau 14 : Coordonnées géographiques des 21 stations du Tell oranais

Code	Stations	X (km)	Y (km)	Z (m)
040104	Marsa ben M'hidi	54,60	209,55	05
040101	Ghazaouet	88,65	205,03	76
160311	Maghnia	95,00	181,35	395
040214	Beni-Saf	124,65	230,00	157
160516	Hennaya	125,45	188,10	410
080102	El-Aricha	131,00	112,15	1250
160706	Tlemcen	132,35	152,65	830
160610	Sidi bounakhla	158,04	201,05	430
110305	Sidi Bel-Abbès	199,10	219,70	470
040402	Es-Senia	199,75	264,05	88
040612	Mostaganem	264,08	296,25	80
111126	Saida	266,08	173,03	867
111406	Mascara	268,00	235,85	590
111417	Ain Fares	277,55	245,30	806
111208	Sidi mimoun	289,01	196,01	683
013505	Relizane	304,54	275,43	81
020102	Khadra	308,07	330,45	150
013002	Frenda	348,60	197,00	990
012917	Tiaret	349,30	228,80	675
012309	Oued sly	365,20	312,70	95
010803	Mehdia	413,09	237,38	903

(ANRH, 1980-2011)

4.1.1.1- Indice de Fournier (1960)

Cet indice permet d'expliquer de manière relative le caractère érosif des régimes climatiques dans leur ensemble. Cette formule est exprimée par le rapport du carré de la pluviométrie moyenne P_i du mois le plus arrosé, sur la pluviométrie moyenne annuelle P . Cet indice représentant l'agressivité des pluies et il a été utilisé dans plusieurs régions du monde (Meddi, 1992 ; Ferro *et al.*, 1999 ; Oduro-Afriye, 1996) et pour estimer les pertes en sol dans les projets d'aménagement. Il présente une bonne corrélation avec l'érosion annuelle moyenne des grands bassins fluviaux du globe.

$$I_f = \frac{P_i^2}{P}$$

P_i: Pluie moyenne du mois le plus pluvieux (mm)

P: Pluie moyenne annuelle (mm)

4.1.1.2- Indice de Fournier modifié (MFI) ou (Arnoldus, 1980)

La formule modifiée de cet indice proposée par Arnoldus, consiste à utiliser la somme des indices de Fournier pour les douze mois de l'année, elle est le rapport entre la somme carrée de la pluviométrie moyenne mensuelle de chaque mois de l'année et la pluviométrie moyenne annuelle. Cette formule a été appliquée au Maroc.

$$IA = \sum_{i=1}^{12} (P_i^2 / P)$$

P_i : Pluie moyenne de chaque mois (mm)

P : Pluie moyenne annuelle (mm).

4.1.1.3- Indice de Rango-Arnoldus (1987)

Plusieurs auteurs dans le Rif central au Maroc ont utilisé le modèle de Wischmeier et Smith pour la quantification de l'érosion, ils ont appliqué l'équation de Rango-Arnoldus pour le calcul du facteur de l'agressivité climatique R, citons entre autres Benmoussa et *al.* (1993), Daghmoumi (1994), Diallo (2000), Al Karkouri (2003) et Sadiki (2005).

Cette formule a donnée satisfaction, les résultats obtenus tiennent compte des caractéristiques du climat du Nord de l'Afrique.

$$\text{Log } R = 1,74 \log \sum_{i=1}^{12} (P_i^2 / P) + 1,29$$

R : agressivité climatique en Méga joules.mm/hectare.heure.an

4.1.1.4- Indice de Deffontaines et De Montard (1968)

Cet indice est utilisé à l'échelle mensuelle pour classer les mois les plus agressifs de l'année.

$$I_d = N \cdot C$$

N : C'est la somme des jours de pluie torrentielles (≥ 20 mm / 24 h)

C : Le pourcentage (%) de pluies mensuelles tombées sous forme torrentielle

En Algérie, Arabi et Roose (1989) et Kouri (1993), mentionnent que les pluies journalières supérieures ou égales à 20 mm par 24 heures sont des pluies torrentielles, provoquant des ruissellements et des transports solides.

4.1.2- Cartographie de l'érosivité des pluies

Des formules ont été sélectionnées et utilisées pour le calcul de l'indice d'érosivité des pluies de plusieurs stations pour faire une interpolation linéaire entre les différentes stations étudiées, et de les spatialiser de manière à les utiliser comme base des données. A partir de ces dernières, un programme d'appui technique (Surfer®) a permis de convertir rapidement ces résultats en carte d'érosivité des pluies et déterminer la répartition géographique des classes d'érosivité afin de localiser des zones d'intervention prioritaire.

Le logiciel Surfer introduit les coordonnées géographiques des stations ainsi que le contour de notre région (Latitude et Longitude), ainsi que la valeur des indices de chaque station pluviométrique dans la table de données «Worksheet», il permet de localiser les différentes stations dans l'espace et de dessiner automatiquement les courbes d'égaux valeurs des indices.

4.2- Le deuxième aspect concerne l'étude de l'érodibilité des sols à l'échelle de deux zones test

L'approche méthodologique consiste à étudier les indicateurs d'érodibilité des sols dans deux zones test : l'embouchure du Chélif et la partie occidentale du bassin versant de l'Oued Mina. Elles sont caractérisées par une lithologie des plus fragiles soit par un substrat à dominance marneuse très sensible au ruissellement et par un couvert végétal dégradé favorisant diverses formes d'érosion.

Le traitement des résultats d'analyses physico-chimiques et mécaniques des échantillons par l'analyse factorielle des correspondances (AFC) permet de classer les différents types de substrat selon leur érodibilité.

Tableau 15 : localisation géographique des échantillons prélevés dans les zones test

Zones test	Ech.		Altitude	Longitude	Latitude
Embouchure du Chélif	1	Marnes vert-clair	25	0° 09' 08,85" E	36° 01' 57,60" N
	2	Marnes bleues	120	0° 10' 04,20" E	36° 02' 06,99" N
	3	Marnes vert-clair jaunâtres	25	0° 09' 03,75" E	36° 01' 56,45" N
	4	Sols bruns vertiques sur marnes	10	0° 09' 29,67" E	36° 01' 50,42" N
	5	Sols peu évolués d'apport alluvial	02	0° 10' 33,13" E	36° 01' 51,29" N
Partie occidentale du bassin versant de l'Oued Mina	6	Marnes grises	197	0° 40' 05,52" E	35° 30' 48,24" N
	7	Marnes brunes	220	0° 36' 33,12" E	35° 28' 50,88" N
	8	Marnes vert-clair armées de grès	297	0° 33' 49,32" E	35° 30' 15,32" N
	9	Marnes bleues compactes et calcaires	204	0° 39' 32,41" E	35° 29' 30,84" N
	10	Marnes brunes armées de calcaire	339	0° 39' 54,36" E	35° 28' 13,08" N
	11	Sols calcaires et marnes	345	0° 32' 13,92" E	35° 25' 36,48" N

4.2.1- Détermination des paramètres intrinsèques des sols à l'échelle de deux zones test

Pour évaluer la résistance d'un sol à l'érosivité des pluies, les principales propriétés pédologiques, il est nécessaire d'étudier : la granulométrie, la perméabilité, la texture, la structure, la nature minéralogique des argiles, le potentiel de retrait-gonflement, l'aptitude à la fissuration, la battance, la résistance au cisaillement, la limite de liquidité et de plasticité et la stabilité structurale.

Pour déterminer l'érodibilité des sols, l'échantillonnage a été effectué à la surface des altérites des différentes formations lithologiques affleurant dans les deux zones test. Chaque échantillon doit correspondre à un type de sol bien défini à titre de deux échantillons par substrat sur lesquels les mêmes analyses ont été pratiquées.

La démarche suivie pour déterminer l'érodibilité des sols dans le Tell oranais comprend les étapes suivantes :

Etape 1 : choix de deux zones test représentatives et menacées par l'érosion dans le Tell oranais ;

Etape 2 : prise des échantillons dans les différentes formations lithologiques ;

Etape 3 : analyses physico-chimiques et mécaniques des échantillons de sols ;

Etape 4 : analyse et interprétation des résultats.

4.2.1.1- Analyses physico-chimiques

- Granulométrie

L'analyse granulométrique a pour but de quantifier pondéralement en pourcentage les particules du sol (sables, limons et argiles) afin de définir la texture du sol.

Les échantillons sont fragmentés en mottes de quelques centimètres. Après séchage à l'air libre, ils sont broyés et passés sous tamis de 2 mm, pour séparer les éléments grossiers de la terre fine. Les caractéristiques des échantillons portent sur l'analyse granulométrique effectuée par la méthode internationale de la pipette de Robinson.

-Test de perméabilité

C'est la vitesse d'écoulement de l'eau dans le sol, déterminée par le perméamétrie à charge constante.

-Triangles texturaux

Ils ont été utilisés pour déterminer la texture, l'aptitude à la fissuration et à la battance, ainsi que la classification des types de Marnes dans les deux zones test du point de vue de la texture d'après le Soil Survey Manual (1951). Les classes de sensibilité à la battance des types de Marnes d'après Ludwig (1992) et la classification des types de marnes dans les deux zones d'étude du point de vue de la stabilité structurale et du point de vue des aptitudes à la fissuration d'après Monnier et Stengel (1982).

La battance est exprimée par l'indice de battance de Boiffin (1984).

$$IB = \frac{1,5 \text{ limons fins} + 0,75 \text{ limons grossiers}}{\text{Argile} + 10 \text{ Taux de Matière organique}} - C$$

Si $pH > 7$, la valeur de C (carbone) = 0,2 et si $pH < 7$, la valeur de C (carbone) = 0

Interprétation :

IB > 2 très battant

IB = 1,8 - 2 battant

IB = 1,6 - 1,8 assez battant

IB = 1,4 - 1,6 peu battant

IB < 1,4 non battant

- Détermination de l'indice d'instabilité structurale

Nous avons utilisé la technique de Henin et Monnier (1956), qui consiste à déterminer la teneur en agrégats stables dans l'eau après divers prétraitements (alcool, benzène), et la dispersion des colloïdes. On obtient un indice d'instabilité structurale par la formule suivante :

$$IS = \frac{A + LF}{\left(\frac{\sum Agi}{3}\right) - 0,9sg}$$

IS : Indice d'instabilité structurale ;

A+LF : Fraction fine (Argile + limon fin), diamètre < 0,02 mm ;

Agi : taux d'agrégats stable <200 μ, obtenus après différents prétraitements ;

Sg : Pourcentage de sable grossier >200 μ.

La détermination de l'indice d'instabilité structurale des échantillons a été faite au niveau de l'INSID.

- Facteur d'érodibilité du sol K

L'érodibilité d'un sol se traduit par la résistance inhérente au détachement et au transport des particules par l'eau. Pour déterminer les valeurs du facteur K, on a eu recours aux résultats des analyses granulométriques, de la structure, de la matière organique, de la texture et de la perméabilité des échantillons prélevés. Wischmeier et Smith (1978) ont développé une équation pour le calcul de l'érodibilité des sols :

$$100k = 2,1 M^{1,14} 10^{-4} (12-a) + 3,25 (b-2) + 2,5 (c-3)$$

Où

M : calculé par la formule $M = (\% \text{ sable fin} + \text{limon}) \cdot (100 - \% \text{ argile})$;

a : pourcentage de matière organique ;

b : code de la perméabilité ;

1 : rapide ; 2 : modérée à rapide ; 3 : modérée ; 4 : modérée à lente ; 5 : lente et 6 : très lente.

c : code de la structure ;

1 : très structuré ou particulière ; 2 : assez structuré ; 3 : peu structuré et 4: massif.

Les valeurs de K correspondant à des types de sols identifiées à partir de l'abaque d'érodibilité des sols en tenant compte de la classe de perméabilité.

On a attribué pour chaque texture la moyenne des valeurs de K trouvé. Ce dernier, est vérifié par le nomographe du Wischmeier et *al.* (1971).

- Carbone et matière organique

Le carbone de la matière organique est oxydé par le bichromate de potassium en présence d'acide sulfurique. En connaissant la quantité de bichromate nécessaire pour cette oxydation, on peut calculer le pourcentage de carbone organique et d'humus dans le sol.

$$\text{MO (\%)} = \text{CO (\%)} \times 1.724$$

MO (%) = Matière organique

CO (%) = Carbone organique

- pH

Le pH est un coefficient qui caractérise l'acidité d'un sol, due à la présence d'ions H⁺, ou la basicité. Il définit la concentration d'ions H⁺ dans la phase liquide du sol. Le pH varie de 0 à 14 et la neutralité est atteinte lorsque le pH est égal à 7. Le principe consiste à mesurer l'électrochimie d'une solution aqueuse du sol à l'aide d'un appareil appelé pH-mètre.

- Calcaire total

Le dosage du calcaire total est réalisé à l'aide du Calcimètre de Bernard, il exprime la réaction du carbonate de calcium (CaCO₃) avec l'acide Chlorhydrique (HCl). Cette technique permet de calculer la quantité du CaCO₃ dans l'échantillon du sol.

- Bases échangeables

La spectrophotométrie consiste en l'émission atomique qui permet de doser le Na⁺ et le K⁺ à l'aide d'une flamme. La deuxième méthode consiste en l'absorption atomique qui permet de doser le Ca⁺⁺ et Mg⁺⁺ par une flamme.

- Capacité d'échange cationique

La détermination de la capacité d'échange cationique (C.E.C) a été réalisée par la méthode de saturation à l'acétate d'ammonium et le dosage par spectrophotométrie à émission.

- Mesure de la salinité des échantillons

Le conductimètre est particulièrement approprié pour la détermination de la minéralisation totale du sol. La mesure de la conductivité électromagnétique (C.E.M) des sols est une méthode qui s'est imposée progressivement pour la mesure de la salinité des sols (en millisiemens par centimètre (mS/cm)).

- Analyse minéralogique des argiles

Onze (11) échantillons ont été effectués à la surface des altérites des différentes formations géologiques affleurant dans l'embouchure du Chéiff et la partie occidentale du bassin versant de

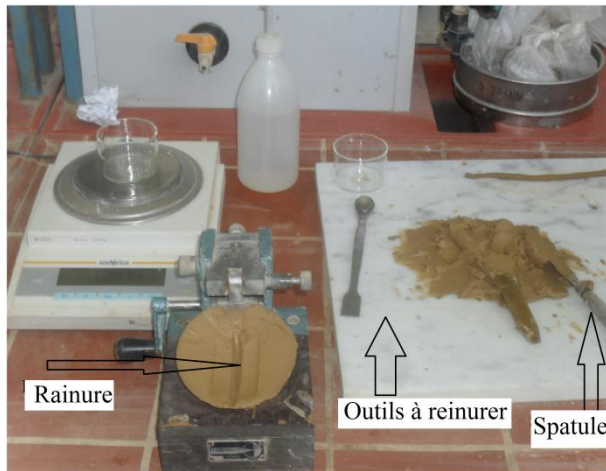
l'Oued Mina. Le choix des échantillons a été fait dans le but d'avoir une gamme assez large de différents types de marne existants dans ces zones.

Pour l'analyse minéralogique des argiles, on a utilisé de la diffraction des rayons X (DRX), cette méthode parmi les techniques les plus utiles et les plus répandues pour l'identification des minéraux argileux et d'estimer leurs proportions dans les échantillons. Elle permet aussi de relier la minéralogie des argiles aux comportements du sol. Les analyses minéralogiques sont effectuées à l'aide de la diffraction des rayons X des échantillons au niveau du laboratoire des minéraux à l'institut de Science de la Terre de l'USTHB. Les diffractogrammes obtenus ont été enregistrés grâce à un appareil Philips XPERT MPD.

4.2.1.2- Analyses mécaniques

- Détermination de la limite de liquidité

La limite de liquidité est déterminée en utilisant l'appareil de Casagrande. Tout d'abord, on nettoie le socle et la coupelle avec un chiffon propre, marque du point de contact de la coupelle avec le socle et réguler la hauteur de chute de la coupelle à l'aide de la vis de réglage, pour ce faire, on fait passer entre la coupelle et le socle, au point de contact à 2 cm. La pâte obtenue est placée dans une coupelle au $\frac{1}{4}$. On procède au nivelage de la surface soigneusement pour obtenir une épaisseur maximum de 10 mm et une surface parallèle à la surface du socle lorsque la coupelle est en contact avec ce dernier. On réalise une rainure centrale qui partage le sol en deux avec l'outil à rainurer tenu perpendiculairement à la surface de la coupelle, à l'aide de la manivelle, on imprime à la coupelle une série de chocs réguliers, à raison de 2 chocs par seconde (figure 25). Il faut également noter le nombre de chocs qui correspond à la fermeture des lèvres de la rainure sur une longueur de 13 mm. La première fermeture doit se faire entre 30 et 40 chocs. Si l'échantillon est sec, la fermeture se fera pour un nombre de chocs plus élevé, on ajoute un peu d'eau à l'échantillon et on malaxe vigoureusement et on reprend l'opération de 1 à 3 fois. On prend à l'aide de la spatule environ 10 g de mélange à l'endroit où les lèvres se sont refermées dans une tare, après la pesée les échantillons seront séchés à l'étuve à une température de 105 °C pour mesurer de la teneur en eau.



Préparation du mélange pour déterminer la limite de liquidité et de plasticité



Remplissage de la coupelle par le mélange du sol

Figure 25 : Détermination de la limite de liquidité par l'appareil de Casagrande

On ajoute un peu d'eau au mélange (1 à 2 cc) et on mélange jusqu'à obtention d'une pâte homogène. On répète les étapes précédentes avec le sillon devant se refermer entre 20 et 30 coups et on répète ces étapes pour 10 à 20 coups.

Pour l'expression des résultats on doit tracer les points expérimentaux sur un formulaire, ces points sont joints par une droite. La valeur de la limite de liquidité est la teneur en eau qui correspond à la fermeture des lèvres de la rainure à 25 coups (figure D en annexe).

$$WL \% = \frac{(\text{Poids Tare} + \text{Sol Humide}) - (\text{Poids Tare} + \text{Sol après l'étuvage})}{(\text{Poids Tare} + \text{Sol après l'étuvage}) - (\text{Poids Tare})} \times 100$$

On tire la valeur de W_L correspondant à 25 coups.

- Détermination de la limite de plasticité

Au début de l'expérimentation et afin de déterminer la limite de liquidité, on a réservé une quantité du mélange pour déterminer la limite de plasticité, après le séchage du mélange on le roule entre les paumes des mains, puis on forme des fuseaux qu'on mincira progressivement. Lorsque le fuseau se brisera en petits morceaux de 1 à 2 cm au moment où son diamètre atteint 3 mm, on pourra dire que le sol a atteint sa limite de plasticité (figure 26). Enfin on place les 3 morceaux obtenus de chaque rouleau brisé, dans une tare pour le peser et le mettre dans l'étuve à 105° C pour déterminer leur teneur en eau.

La limite de plasticité (W_P) sera la moyenne des teneurs en eau de ces 3 échantillons.

$$W_P = \frac{\sum WP}{3}$$

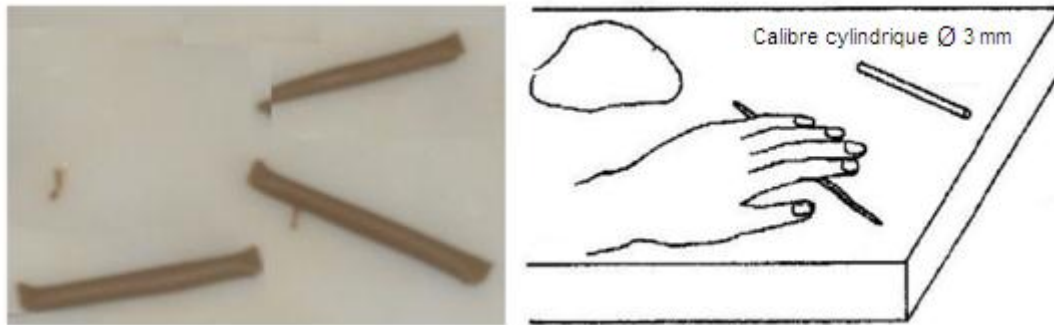


Figure 26 : Roulage des boulettes sous forme de fuseaux de 3 mm

- Calcul de l'Indice de plasticité (I_p %)

C'est la différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité, on mesure l'étendue du domaine de plasticité du sol.

$$I_p = W_L - W_p$$

I_p : Indice de plasticité,

W_L : Limite de liquidité

W_p : Limite de plasticité

- Résistance au cisaillement

L'essai de cisaillement à la boîte, conduit à déterminer les caractéristiques mécaniques d'un sol en procédant au cisaillement rectiligne d'un échantillon sous charge constante. L'essai de cisaillement permet de tracer la courbe intrinsèque du sol étudié et de déterminer son angle de frottement interne φ et sa cohésion C . La détermination de la contrainte admissible par le sol dans le cas de ruissellements superficiels et la poussée du sol. Il constitue le test idéal pour étudier un échantillon de sol soumis à deux forces semblables à celles de l'état naturel, un effort latéral (ruissellement de l'eau) sur un sol soumis à une pression verticale (matériaux submergés par l'eau d'écoulement).

Notre essai à la boîte de Casagrande est un essai de sol cohérent consolidé non drainé, l'échantillon est placé dans la boîte de Casagrande, où il est soumis à une contrainte normale et cisailé à vitesse contrôlée de l'ordre de 1 mm / minute ; on note pour une contrainte normale donnée, l'effort de cisaillement en fonction du déplacement. Pour chaque essai, on trace les courbes de contraintes en fonction des déplacements $\tau = f(\Delta l)$, (figure 27), en déduit les valeurs des courbes de cisaillement maximale qui tracent les contraintes de cisaillement à la rupture (τ_r). On reporte ensuite chaque point sur un graphique ayant pour abscisse la contrainte normale σ et pour ordonnée la contrainte de cisaillement (tangentielle) τ . ensuite on trace la courbe intrinsèque $\tau_r = f(\sigma)$, pour déduire les caractéristiques de rupture du sol C et φ (cohésion et angle de frottement), (figure 28).

Les résultats sont tracés point par point pour obtenir dans le premier cas une courbe de cisaillement-déformation et dans le deuxième cas une courbe intrinsèque (une droite qui passe par l'origine).

La formule est donnée par la loi de Coulomb :

$$r = c + \sigma \text{Tg}(\Phi)$$

Où :

r : Tension tangentielle ; σ : Tension normale ; C : Cohésion ayant les dimensions d'une contrainte.

Tg : tangente ; Φ : Angle de frottement interne.

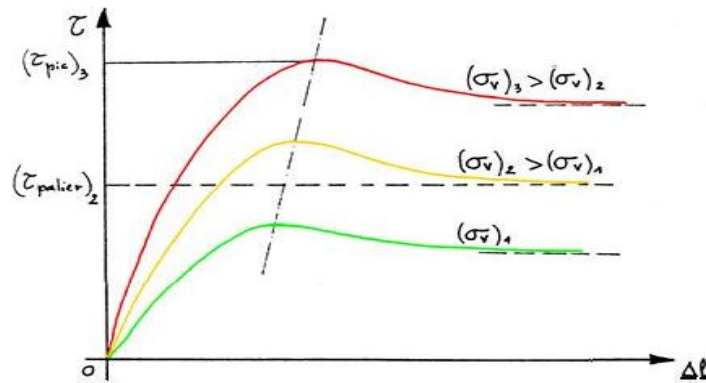


Figure 27 : La contrainte de cisaillement est celle donnée par la rupture

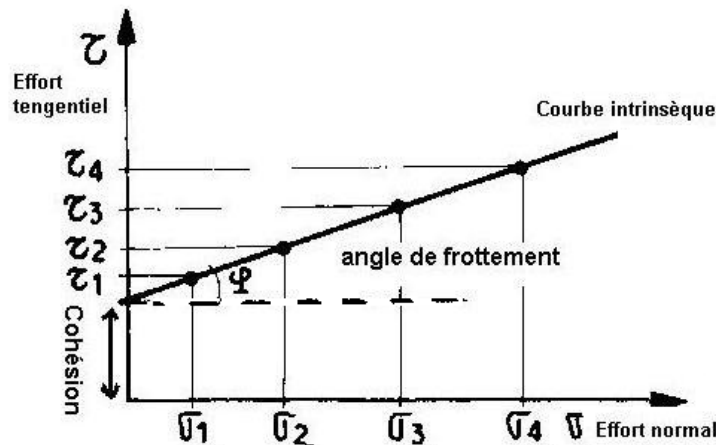


Figure 28 : Détermination graphique de la cohésion et l'angle de frottement

4.2.2- Traitement statistique des résultats

Pour éclairer les résultats d'analyse physico-chimique et mécanique des échantillons obtenus et tenter d'expliquer directement la sensibilité des substrats marneux par l'érosion pluviale, nous avons jugé utile d'effectuer une analyse factorielle des correspondances (AFC), cette analyse de traitement des données relative aux processus d'érosion identifiés a été retenue pour les raisons suivantes :

Elle permet de déterminer le traitement symétrique aussi bien du nuage des variables que celui des échantillons

Elle établit un bilan des liaisons entre les variables du milieu explicatives et la dégradation du substrat.

L'ensemble des données comporte 11 variables actives et une variable supplémentaire (classe d'érodibilité).

Le but recherché du traitement était de mettre en lumière les variables explicatives (texture, structure, perméabilité, battance, plasticité, stabilité structurale, cohésion, aptitude à la fissuration) et les individus et de découvrir les interrelations entre les différentes variables et l'érodibilité.

4.2.2.1- Démarche d'analyse

Nous avons retenu pour chaque variable un nombre de classes significatives pour faciliter l'interprétation des résultats, afin d'éviter la perte d'informations.

Elle consiste d'abord à résoudre le problème d'hétérogénéité des données formant le tableau initial, en précisant au logiciel qu'il s'agit des données qualitatives ou quantitatives.

Les modalités des variables qualitatives et quantitatives sont codées de (1) jusqu'à (n) selon les observations retenues. Il a été attribué à chaque modalité un libellé (abréviation) pour faciliter sa détection sur le graphique.

4.3- Le troisième aspect concerne la cartographie du risque d'érosion par approche (Télétection/SIG/USLE) à l'échelle de la partie occidentale du bassin versant de l'Oued Mina.

Cet aspect porte sur l'évaluation du risque d'érosion des sols par une approche télétection/SIG/USLE. Vu le manque de données, on n'a pas pu cartographier l'ensemble du territoire du Tell oranais (42.440 km²). A cet effet, et pour appliquer cette technique sur une grande échelle, le choix s'est porté sur seulement la partie occidentale du bassin versant de l'Oued Mina. C'est une zone argileuse très susceptible à l'érosion hydrique. Les techniques de Système d'Information Géographique (SIG) ont été adoptées pour traiter les données obtenues à l'échelle de cette zone. Le modèle USLE a été mis en œuvre à partir de vingt années de données d'essais d'érosion en parcelles et sur des petits bassins versants de la grande plaine Américaine par Wischmeier et Smith (1978). Il constitue l'un des modèles les plus adaptés pour l'estimation annuelle de l'érosion hydrique potentielle des sols. Ce modèle a été utilisé dans différents milieux et à différentes unités de paysage topographiquement complexes telles que les pentes escarpées et le terrain accidenté (Desmet and Govers 1996). Le modèle a été largement utilisé dans le monde entier sous sa forme originale ou modifiée (Morschel et Fox, 2004), y compris au Maghreb par Touaibia *et al.* (2000), El Garouani *et al.* (2003 et 2008), Sadiki *et al.* (2004) et Toumi *et al.* (2013). Notre objectif est de fournir une estimation de la quantité annuelle de pertes en sol dans la partie

occidentale du bassin versant de l'Oued Mina. L'équation a été intégrée sous un système d'information géographique afin de permettre une modélisation et une cartographie exhaustive du phénomène érosif, en se basant sur les données de la télédétection et l'approche du système d'information géographique. L'équation prend en compte cinq facteurs qui servent à calculer les pertes en sol (E) : dont l'équation se présente comme suit :

$$E = R . K . L . S . C . P$$

E : étant le taux annuel de perte en sol en t/ha/an, c'est le produit de cinq facteurs d'érosion à savoir;

R : étant le facteur de l'érosivité des pluies qui correspond à la moyenne annuelle des sommes des produits de l'énergie cinétique de la pluie par son intensité en 30 mn consécutives ; il est exprimé en MJ. mm / ha. H. an ;

K : étant le facteur de l'érodibilité des sols, il dépend de la granulométrie, de la quantité de matière organique, de la perméabilité et de la structure du sol, il est exprimé en t. ha. H / ha. MJ. mm ;

L et S : étant deux facteurs représentent l'inclinaison (S en %) et la longueur de pente (L en m) ;

C : Effet du couvert végétal ;

P : étant un facteur sans dimension, qui tient compte des techniques culturales antiérosives telles que le labour en courbes de niveau.

Chacun de ces facteurs a été exprimé sous forme de carte thématique, dont l'ensemble va aboutir à l'élaboration de la carte de pertes en sol selon l'organigramme suivant :

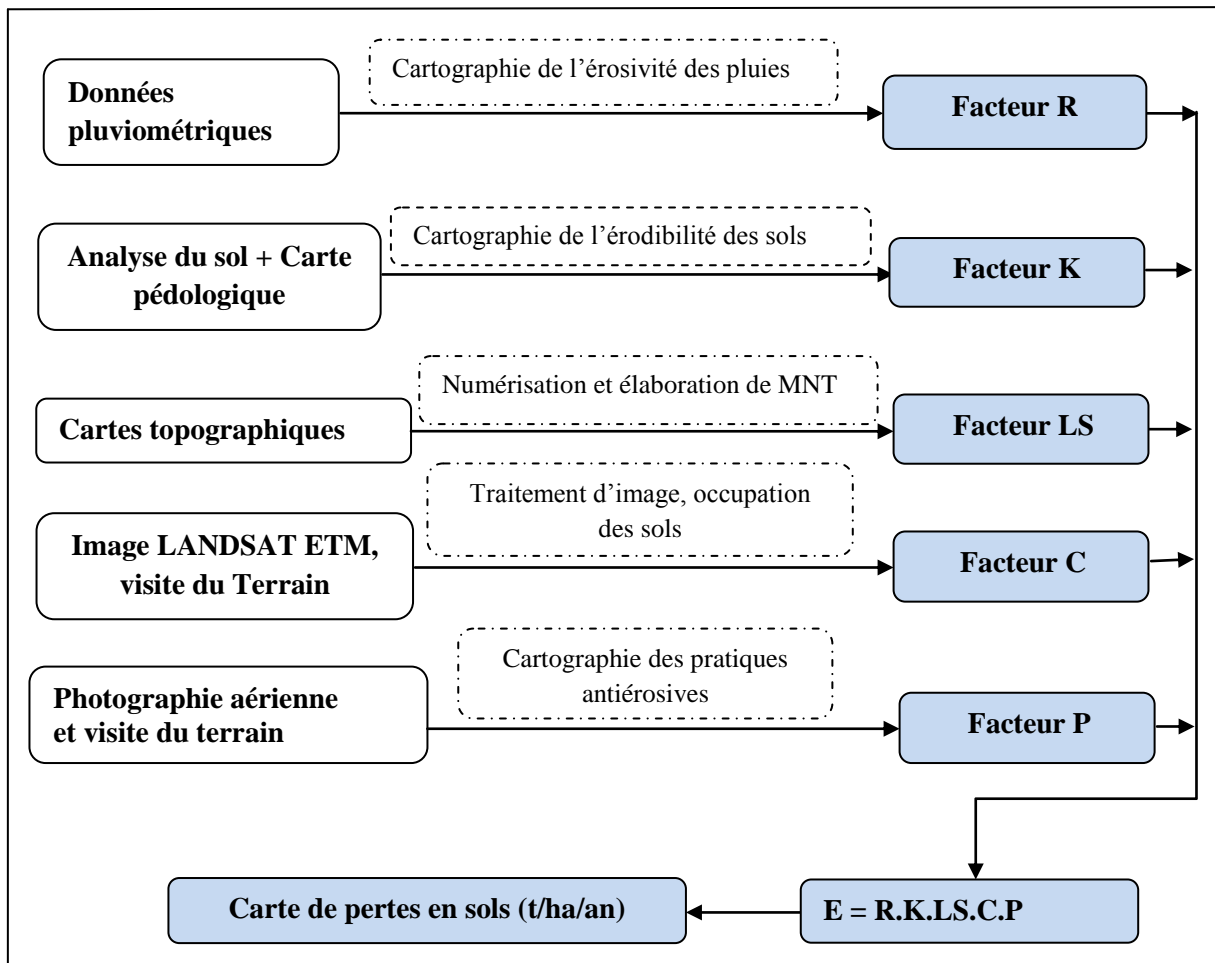


Figure 29 : Organigramme de la méthodologie suivie pour la cartographie du risque d'érosion

4.3.1- Localisation et caractéristiques de la partie occidentale du Bassin versant de l'Oued Mina

Cette partie du bassin versant de l'Oued Mina située dans le Tell Oranais, entre 0° 18' 15"E et 0° 50' 41"E et entre 35° 18' 30"N et 35° 35' 09"N, occupe une superficie de 74.780 ha, dont une prédominance des terrains fragiles prédisposés à la dégradation, composée de roches tendres sensibles à l'érosion et un couvert végétal dégradé. Les sédiments issus de cette zone sont transportés par le ruissellement vers le barrage Sidi M'hamed Ben Aouda et constituent un risque majeur pour l'envasement de ce dernier. Plusieurs études ont été faites dans cette zone pour expliquer le processus érosif, tel que Kouri (1993), Kouri et Gomer (2010), Touaibia (2000) et Toumi (2013).

4.3.2- Evaluation des facteurs de l'USLE

L'USLE est composée de cinq facteurs qui permettent d'obtenir une estimation de l'érosion (E) en tonnes/hectares.an.

4.3.2.1- Facteur d'érosivité de la pluie R

Le calcul du facteur R, nécessite la connaissance de paramètres ou caractéristiques des pluies à savoir : l'énergie cinétique globale des gouttes de pluie et l'intensité maximale de pluies observées en 30 minutes.

Cet indice a été redéfini par la suite, par plusieurs chercheurs, dans différentes régions du globe. Ces auteurs ont développé, après plusieurs années de recherches, de nombreuses équations alternatives et d'autres indices empiriques permettant d'estimer le facteur R en fonction des précipitations mensuelles et annuelles (Kalman, 1970 ; Roose, 1977 ; Arnoldus, 1980 ; Rango-Arnoldus 1987 ; Renard et Freimund, 1994). Ces indices sont appliqués lorsqu'on ne dispose pas des paramètres nécessaires pour le calcul de l'indice universel. Dans notre cas, nous avons sélectionné l'indice de Fournier modifié MFI (Arnoldus, 1980) pour estimer le facteur R. Le choix de cette équation parmi d'autres revient à son adaptation aux variations de terrain à l'échelle mondiale, contrairement aux autres méthodes qui sont généralement des équations déterministes locales.

La formule d'Arnoldus est citée dans le premier aspect ayant porté sur l'étude de l'érosivité des pluies (voir § 4.1.1.2- Indice de Fournier modifié MFA).

4.3.2.2- Facteur d'érodibilité du sol K

Pour déterminer les valeurs du facteur K, les échantillons sont prélevés sur l'ensemble de la partie occidentale du bassin versant de l'Oued Mina, les échantillons ont été choisis à partir des observations et de la carte lithologique élaborée par Kouri (1993), à raison de deux échantillons par types de sol, soit un total de 22 échantillons. Les analyses sont effectuées par la méthode utilisée pour le calcul du facteur K et exposé au 2^{ème} aspect (§4.2.1.1.5- Facteur d'érodibilité du sol K).

4.3.2.3- Facteur topographique LS

La longueur et l'inclinaison de pente sont des paramètres qui influencent considérablement l'érosion des sols. La longueur de pente conditionne la vitesse de ruissellement et le transport des particules, plus la pente est importante, plus le débit de ruissellement augmente et augmente ainsi son pouvoir érosif.

Le facteur topographique (LS) dont (L) la longueur des pentes (mètre) et (S) est la pente (%), calculés à partir du Model Numérique de Terrain (MNT) au pas de 30 m. Pour adapter la formule empirique initiale aux conditions de terrain de montagne avec une topographie complexe, LS est estimé à partir d'un DEM (Wang et *al.*, 2002), en particulier, on fait intervenir une aire d'accumulation et la pente qui rend son utilisation adaptée à l'utilisation du SIG et du MNT. On obtient alors la formule suivante :

$$LS = (\text{Flow Acc. pas du MNT}/22.13)^{0.4} \cdot (\text{Sin Pente}/0.0896)^{1.3}$$

Avec :

- Flow Acc : « Flow Accumulation »
- Pas du MNT : 30 m

4.3.2.4- Facteur du couvert végétal C

Le couvert végétal protège les sols et dissipe l'énergie des gouttes de pluie. Les principales caractéristiques du couvert végétal influençant l'érosion sont :

- La densité (recouvrement du sol) dans le temps et dans l'espace ;
- La hauteur des arbres ;
- L'apport de matière organique.

L'occupation du sol a été réalisée à partir des outils de la télédétection (image satellite à très haute résolution spatiale et spectrale), téléchargée à partir du site USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). L'image satellite est acquise par le satellite LANDSAT ETM, une scène couvrant la zone test a été prise en avril 2015 (Path/Row: 197/035). L'image a été intégrée dans un SIG pour pouvoir extraire et mettre à jour les informations cartographiques et thématiques. Des prétraitements ont été réalisés à savoir les corrections géométriques et radiométriques. Une fois les données recueillies et prétraitées, le passage à la vérification est nécessaire pour lever les incertitudes liées aux informations non apparentes observées sur les images et les cartes topographiques. Une visualisation de l'imagerie sur Google Earth Professional est ensuite effectuée, suivie d'une visite sur le terrain pour une meilleure description des différentes unités cartographiques et délimiter les différentes strates du couvert végétal (Forêt, matorral, parcelle cultivée, sol nu, ...etc) afin de valider la classification de l'image. Une valeur de C a été attribuée à chaque classe de végétation. Wischmeier (1975) propose pour la végétation naturelle, une estimation de l'indice C en relation avec les différents paramètres tels que les hauteurs et les densités des strates végétales susceptibles d'intercepter l'énergie des pluies.

Le facteur C est défini comme le rapport entre les pertes en sol nus sous des conditions spécifiques et les pertes en sol correspondants aux sols sous système d'exploitation. Ce facteur est calculé en utilisant les équations empiriques contenant les mesures sur le terrain de la couverture du sol (Wischmeier et Smith, 1978). Il varie de 1 sur un sol nu à 33/100 sous forêt. Il y a plusieurs méthodes pour estimer le facteur C, utilisant les valeurs de NDVI pour l'évaluation de la perte de sol avec USLE (Wang et al., 2002). Ces méthodes utilisent le modèle de régression pour effectuer une analyse de corrélation entre Valeurs du facteur C mesurées sur le terrain ou obtenues du guide tableaux et NDVI dérivés d'images captées. Le couvert végétal peut être estimé par l'écart normalisé de l'indice de végétation (NDVI).

La droite de régression trouvée est : $C = 0,9167 - 1,1667 \text{ NDVI}$

La classification de la végétation est réalisée suivant les conditions de seuillage suivantes :

$\text{NDVI} < - 0,1$: Eau

$- 0,1 < \text{NDVI} < 0,15$: Sol nu

$0,15 < \text{NDVI} < 0,25$: Végétation clairsemée

$0,25 < \text{NDVI} < 0,4$: Végétation moyennement dense

$\text{NDVI} > 0,4$: Végétation dense

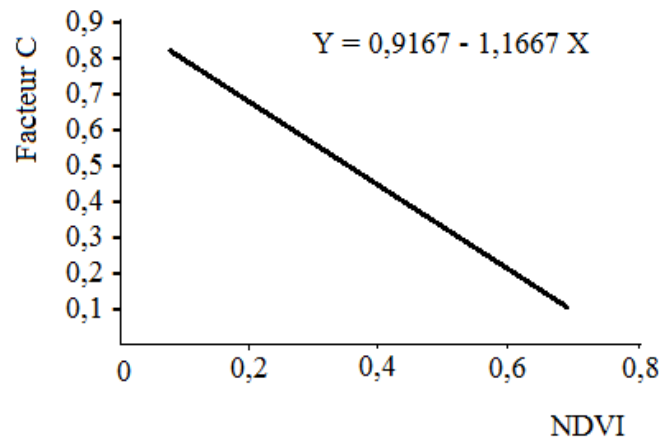


Figure 30 : Relation entre le facteur C et le NDVI

4.3.2.5- Facteur des pratiques antiérosives P

Les pratiques antiérosives décrivent les actions de conservation du sol, elles concernent toutes les techniques culturales mises en œuvre pour diminuer le ruissellement et l'érosion hydrique. Les valeurs de P varient généralement de 0 à 1, selon la pratique adoptée et selon la pente. Dans la partie occidentale du bassin versant de l'Oued Mina, les pratiques antiérosives sont le labour en courbes de niveau, les cultures en courbes de niveau, en bandes alternées ou en terrasses, les reboisements en banquettes, le buttage et le billonnage pour les cultures maraichères en courbes de niveau (Laouina, 2007).

4.3.2.6- Cartographie des pertes en sol

L'intégration des cinq facteurs de USLE sous forme de base de données dans un SIG a permis la présentation des résultats sous forme de cartes de chaque facteur (figure 31). La superposition cartographique au moyen du SIG, a abouti à l'élaboration de la carte de pertes en sol de la partie occidentale du bassin versant de l'Oued Mina (E en T/ha/an par unité spatiale (pixel du MNT) Cette démarche est schématisée par la figure suivante :

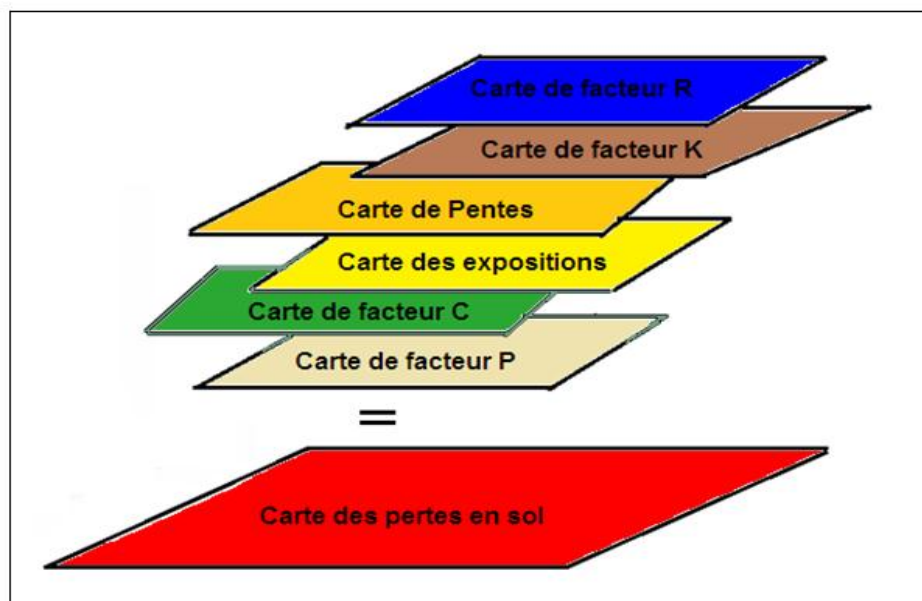


Figure 31 : Elaboration de la carte finale des pertes en sol

4.4- Le quatrième aspect concerne l'application d'un modèle de lutte contre le ravinement

L'objectif de cet aspect est de proposer une série d'actions et techniques peu coûteuses de lutte contre le ravinement et départ des sédiments qui s'articuleront autour de modèles adaptatifs d'aménagement intégré permettant de mieux gérer les ressources hydriques (amélioration de l'infiltration de l'eau dans un milieu très argileux) tout en dissipant l'énergie du ruissellement et la diminution de sa capacité de transport. On se propose donc d'évaluer l'efficacité des seuils et le coût afin de maîtriser le ravinement et la stabilité du bassin versant initialement défriché, sur-pâturé et raviné par la mise au point de techniques de luttes antiérosives adéquates. L'utilisation des matériaux disponibles localement et les actions doivent réduire progressivement la dégradation du milieu physique en agissant sur :

- La régularisation du régime des eaux de surface qui aura pour effet de réduire les débits solides et liquides. La stabilisation des ravines et leurs effets sur la protection des surfaces agricoles et la diminution de l'envasement des barrages.
- L'amélioration de l'infiltration des eaux de ruissellement qui se traduira par une augmentation des réserves en eau dans le substrat disponible pour la végétation en place ce qui se traduit par une augmentation de la production et une tendance pédoclimatique évolutive.

Donc il faut trouver des alternatives efficaces et durables à ces problèmes en introduisant des espèces végétales et des variétés sélectionnées capables de fournir un meilleur rendement, en améliorant la fertilité du sol par des apports en matière organique.

Ce traitement de la ravine a été lancé dans la zone où la perte en sol est élevée sur une superficie de 200 ha. Son altitude est comprise entre 200 et 350 m. Elle est occupée par un faible recouvrement

sous forme de matorral clair de Pin d'Alep et par des cultures annuelles. Le substrat lithologique est à dominance marneuse avec quelques plages de grés et des intercalations très peu étendues de schistes, très sensibles au ruissellement. Par conséquent, il y a une manifestation très avancée de l'érosion hydrique. Cette situation demande une intervention pour arrêter l'élargissement des formes d'érosion et protéger les infrastructures qui sont situées en aval.

Malgré d'anciens travaux de correction torrentielle avec plantations d'*Acacia cyanophylla*, effectuées par la conservation des forêts, le problème de l'érosion reste encore posé. En effet, les dégâts ne cessent d'augmenter et on peut dire que les techniques employées s'avèrent insuffisantes. Parmi les techniques préconisées pour lutter contre le ravinement, les seuils qui sont peu coûteux et efficaces et la plantation des espèces forestières, fruitières et fourragères afin de développer des ouvrages mixtes mécaniques et biologiques.

4.4.1- Correction mécanique

Pour contrer le ravinement, nous avons procédé à l'implantation de différents types de seuils disposés en répétition le long de la ravine et dont la disponibilité des matériaux est en abondance au niveau de la région. L'utilisation des outils de topographie appropriée comme le Théodolite pour mesurer la dénivelée, le profil en long. Les distances à partir de l'axe du projet vers les différents points du profil en travers sont déterminées à l'aide d'un décimètre. Le traçage de la ravine d'une manière générale débute de l'amont vers l'aval (l'aménagement doit commencer à partir d'un secteur stabilisé). A la tête de la ravine sera confectionné un seuil verrou (gabion en pierre sèche) pour donner beaucoup plus de résistance et d'efficacité aux seuils légers qui y succèdent.

Le nombre des seuils se calcule en fonction de la pente, la longueur de la ravine et la hauteur moyenne des lits, la formule appliquée pour déterminer le nombre des seuils en Algérie est celle donnée par Greco (1966) :

$$L \cdot N = \frac{I \cdot P}{H}$$

N : Nombre de seuils

L : Longueur de la ravine

P : Pente moyenne du lit

I : Pente de compensation déterminée expérimentalement

H : Hauteur moyenne des lits

4.4.1.1- Seuil en gabion

C'est une cage ayant la forme d'un parallépipède rectangulaire en grillage galvanisé rempli de pierres (pierre dure et non poreuse).

Les mailles sont de forme hexagonale, de dimensions 100 mm/120 mm à double torsion pour éviter la blessure des fils. Le fil doit avoir un diamètre de 03 mm.

4.4.1.2- Seuil en pierre sèche

Ce type de seuil n'est pas nouveau dans la région, il est très pratique dans le cadre de la correction torrentielle utilisé par la conservation des forêts.

La technique de construction consiste à utiliser des matériaux non poreux ni friables de préférence des roches éruptives pour assurer la stabilité de l'ouvrage.

4.4.1.3- Seuil en sacs plastiques

Le principe de l'installation des seuils en plastique est basé sur la superposition des sacs remplis de sables filtrant ou de terre avec une teneur nulle ou minime en argile.

Une fois les sacs remplis et que les fondations sont préparées, les sacs sont superposés les uns sur les autres dans le sens horizontal et perpendiculaire au lit de la ravine. La seconde disposition consiste à superposer les sacs dans le sens horizontal et jeter de la terre au pied du seuil pour amorcer la sédimentation.

4.4.1.4- Seuil en traverses de bois

Les seuils sont composés de troncs d'arbres (billots) de 100 à 150 mm de diamètre liés ensemble avec un fil de fer.

Une maille extrudée en plastique fixée à l'amont des troncs et qui continue à l'aval sous la fosse, ce qui empêche le lessivage du matériel fin et permet un bon colmatage des sédiments entre les billots.

La pierre est prévue sur le talus et sur le fond de la fosse afin d'augmenter la stabilité de ces derniers. Deux piquets à chaque extrémité sont envisagés afin de faciliter l'assemblage et de maintenir la verticalité du seuil. Un déversoir d'environ 10/30 cm sera taillé sur la dernière pièce du haut pour concentrer le débit d'écoulement.

4.4.1.5- Seuil en pneus usagés

Les pneus sont positionnés et sont superposés les uns sur les autres dans le sens perpendiculaire au lit de la ravine et remplis de terre, ils sont renforcés par des troncs d'arbres, on étale de la terre au pied du seuil pour amorcer la sédimentation.

4.4.2- Correction biologique

Dans cette zone la fixation biologique joue un rôle important en complément avec la correction mécanique, le reboisement protège la couche arable :

- Contre l'impact des gouttes de pluie (splash) ;
- Favorise l'infiltration et diminue le ruissellement ;
- Apporte la matière organique dans le sol, ce qui améliore sa stabilité structurale et donc sa résistance à l'érosion.

4.4.2.1- Au niveau de la ravine

Les actions mécaniques de la correction torrentielle sont insuffisantes, l'aménagement associé (mécanique et biologique) de stabilisation des têtes de ravines et des berges par des procédés biologiques doit être préconisé. L'établissement d'une couverture végétale continue et permanente soutenue par des haies antiérosives sous forme d'une plantation en ligne et interlignes selon les courbes de niveau et bandes enherbées. La végétation des interlignes diminuerait les risques de glissement de terrain par la répartition des eaux d'infiltration sur une plus grande surface. Les haies vives ralentissent l'écoulement des crues et favorisent le dépôt d'alluvions dans le fond de la ravine. Il s'agit de sélectionner et développer des espèces fourragères, forestières et arboricoles. Ces espèces ayant une capacité de recouvrement élevée et un système racinaire très développé, améliorent la cohésion des marnes et dissipent l'énergie du ruissellement. Les plantations doivent être effectuées sur les parties sommitales et les têtes de ravines, afin d'empêcher l'érosion de se produire, mais elles permettent également de piéger des sédiments érodés.

4.4.2.2- Au niveau des interfluves

Compte tenu des techniques antiérosives pratiquées dans la région, et de l'analyse des données bibliographiques nous avons retenu les techniques antiérosives au niveau des interfluves, ci-après :

- **Labour en courbe de niveau**

Le labour selon les courbes de niveau augmente la macroporosité et l'humidité du sol aussi les rendements, c'est pourquoi nous suggérons la vulgarisation de cette technique auprès des agriculteurs. Le labour et surtout le billonnage cloisonné en courbes de niveau sur des pentes faibles (inférieur à 8 %) améliorent le stockage des eaux de surface et les rendements des cultures alors en montagne sur des pentes supérieures à 25 %, les pertes de terre augmentent (Roose et *al.*, 2012). La culture en courbes de niveau dans des conditions idéales augmenterait les rendements des cultures en ligne de près de 50 %. Cette technique réduit de manière significative l'érosion du sol.

- **Semis direct**

C'est une technique culturale simplifiée, basée sur l'introduction directe de la graine dans le sol, sans passer par le travail du sol, c'est-à-dire qu'il y a absence de retournement, de décompactage ou de préparation de lit de semence. On préconise de pratiquer cette technique sur des sols vulnérables à l'érosion hydrique.

- **Pseudo labour**

C'est une technique de travail du sol sur la couche superficielle ou sur une profondeur limitée mais selon les conditions du milieu entre 5 et 10 cm (décompactage de la couche superficielle sans mélanger les couches juxtaposées). Cette technique de labour ne fragmente pas le sol sauf sur la

ligne de semis et contribue à l'amélioration de la stabilité structurale et la porosité du sol ce qui augmente sa rétention en eau.

- Les cordons pierreux (murettes)

Il s'agit de deux à trois niveaux de pierres rangées en courbe de niveau de façon à se renforcer l'une à l'autre. Les cordons de pierres sont en principe installés perpendiculairement aux écoulements. Les diguettes en pierres sont une technique traditionnelle de lutte contre la dégradation des sols par l'érosion hydrique. Elle vise à freiner la vitesse des eaux de ruissellement qui s'écoulent à la surface du sol, à assurer l'infiltration d'une plus grande quantité d'eau dans le sol pour une alimentation additionnelle des plantes, à reconstituer les terres dégradées.

- Rotation des cultures

La rotation est la succession dans le temps de cultures sur une même parcelle. L'objectif de la rotation des cultures est de prévenir les maladies, apporter la bonne quantité de substances nutritives aux plantes et minimiser l'érosion en ayant toujours une culture en place. La culture des mêmes spéculations sur la même parcelle, risque de faire apparaître des maladies et infestations parasitaires des végétaux. Celles-ci peuvent se développer et occasionner de nombreux dégâts.

- Plantation en courbes de niveau

La plantation effectuée perpendiculairement à la pente ou parallèlement aux lignes de niveau favorise l'infiltration de l'eau mais contribue surtout à réduire le ruissellement, évitant ainsi la formation du ravinement. Les prolongements systématiques des seuils des murets de terrassement ont permis l'installation de haies ligneuses en courbe de niveau sur l'ensemble du versant. Les haies vives, ont permis de réaliser des paillages réguliers des champs et la fertilisation des sols.

- Culture en bandes alternées

La pratique de la technique en bandes alternées de différentes cultures peut apporter de nombreux avantages agronomiques et économiques, tels qu'une stabilisation des sols, une meilleure conservation de l'eau, une meilleure photosynthèse sur les bords de parcelles, ainsi qu'une réduction des maladies et ravageurs. Certaines études ont démontré que l'aménagement en bandes alternées augmentait le rendement et la diminution du nombre d'insectes ravageurs, ainsi qu'une augmentation d'ennemis naturels et du taux de parasitisme, comparativement à un aménagement en monoculture.

- Amendement

L'apport des substances nutritives se fait grâce au fumier du bétail et résidus des végétaux (compost) qui est indispensable pour la fertilité des sols. Les branchages protègent le sol contre

l'impact des gouttes de pluie et réduit ainsi l'érosion hydrique. Ces résidus deviennent avec le temps des matières organiques bénéfiques aux sols.

- Stabilité structurale

Le paillage et la végétalisation améliorent l'infiltration tout en limitant l'impact des gouttes de pluies. L'apport de matière organique favorise la formation d'agrégats stables et par conséquent une réduction de leur érodibilité.

CHAPITRE V
RESULTATS ET DISCUSSIONS

5.1- Résultats

5.1.1- Calcul des indices d'érosivité des pluies

Les indices de Fournier, d'Arnoldus, Rango-Arnoldus et Deffontaines ont été calculés pour vingt et une (21) stations pluviométriques réparties sur l'ensemble du Tell oranais.

Tableau 16 : Valeurs de l'Indice de Fournier, d'Arnoldus et de Rango-Arnoldus.

Stations du Tell oranais	Indice de Fournier	Indice d'Arnoldus	Indice de Rango-Arnoldus
Marsa ben M'hidi	9,43	37,24	55,90
Ghazaouet	16,85	44,38	63,82
Maghnia	5,95	31,58	49,35
Beni-Saf	9,34	29,83	47,27
Hennaya	7,84	44,37	63,81
El-Aricha	6,84	21,21	36,53
Tlemcen	8,41	33,06	51,09
Sidi bounakhla	8,24	39,33	58,25
Sidi Bel-Abbès	6,27	34,67	52,96
Es-Senia	10,54	37,12	55,76
Mostaganem	12,36	42,46	61,72
Saida	4,67	33,86	52,02
Mascara	8,96	33,45	51,54
Ain Fares	9,53	45,37	64,90
Sidi mimoun	5,96	31,96	49,80
Relizane	6,05	29,86	47,31
Khadra	12,35	41,95	61,16
Frenda	6,14	35,72	54,17
Tiaret	6,58	35,56	53,98
Oued Sly	7,26	32,03	49,88
Mehdia	4,84	30,24	47,76

Période 1980-2011

5.1.1.1- Indice de Fournier

Le tableau 16, montre que les valeurs de l'indice de Fournier varient de 4,67 (station Saida) et 16,85 (station Ghazaouet).

Les valeurs les plus faibles sont enregistrées au niveau des stations de Mehdià (4,84), de Maghnia (5,95) et de Sidi Mimoun (5,96) alors que les stations qui ont des valeurs élevées sont celles de Mostaganem (12,36), de Khadra (12,35) et d'Es-senia (10,54).

D'après l'échelle conceptuelle pour l'évaluation de l'indice de Fournier, nos stations présentent un indice inférieur à 20 MJ.mm/ha.h.an, qui indiquent un risque d'érosivité très lent avec une perte de sol inférieure de 5 t/ha/an (tableau 17).

Tableau 17 : Échelle conceptuelle pour l'évaluation de l'indice de Fournier (Oduro-Afriyie, 1996)

Classes	Perte de sol (t/ha/an)	Indice de Fournier	Risque d'érosion
1	< 5	< 20	Très lent
2	12 - 25	21 - 40	Faible
3	25 - 50	41 - 60	Modéré
4	50 - 100	61 - 80	Sévère
5	100 - 200	81 - 100	Très sévère
6	> 200	> 100	Extrêmement grave

5.1.1.2- Indice d'Arnoldus

Les valeurs de l'indice d'Arnoldus varient entre 21,21 (station d'El Aricha) et 45,37 (station d'Ain Fares). Selon les classes d'érosivité proposées dans le C.E.C (1992) les valeurs de l'indice d'Arnoldus sont inférieure à 60 ($I_A < 60$) donc le risque d'érosion est très faible pour l'ensemble des stations du Tell oranais (tableau 17).

Selon Arnoldus (1980), cet indice est une bonne approximation du facteur d'agressivité des pluies (R) dont il est linéairement corrélé.

Tableau 18 : Classes de MFI (CEC, 1992)

Classes	Description	MFI range
1	Très faible	< 60
2	Faible	60 - 90
3	Modéré	90 - 120
4	Elevé	120 - 160
5	Très Elevé	> 160

5.1.1.3- Indice de Rango-Arnoldus

L'indice de Rango-Arnoldus des stations du Tell oranais varie de 36,53 (station d'El-Aricha) et 64,90 (station d'Ain Fares), (tableau 18).

Selon les classes d'érosivité proposées dans le C.E.C (1992), le risque d'érosivité des pluies dans le Tell oranais est très faible ($I_A < 60$) pour la majorité des stations, alors qu'il est faible ($60 < I_A < 90$) pour cinq stations : Khadra (61,16), Mostaganem (61,72), Hennaya (63,81), Ghazaouet (63,82) et Ain Fares (64,90).

5.1.2- Corrélation entre les indices d'érosivité des pluies

Les valeurs de l'indice d'érosivité les plus élevées correspondent aux pluviométries élevées, les stations du littoral sont caractérisées par une forte précipitation reflétant une forte valeur de l'indice d'Arnoldus.

5.1.2.1- Coefficient de détermination entre l'indice d'Arnoldus et celui de Fournier

La régression entre l'indice d'Arnoldus et celui de Fournier donne un coefficient de détermination linéaire non significatif au seuil de 5 % ($R^2 = 0,380$). L'équation de régression s'écrit alors comme suit : $IA = 1,258 IF + 25,03$.

Le nuage de points n'a pas la forme de la droite de régression, il existe une liaison faible entre l'indice d'Arnoldus et l'indice de Fournier ($R^2 = 0,380$), (figure 32).

5.1.2.2- Coefficient de détermination entre l'indice d'Arnoldus et Rango-Arnoldus

La figure 33 montre que tous les points (valeurs de l'indice calculé) sont très proches de la droite de régression (relation linéaire). La corrélation entre l'indice d'Arnoldus et de Rango-Arnoldus est hautement significative au seuil de 5 % et 1 % ($R^2 = 0,999$), cela signifie qu'il existe un lien très fort entre les deux indices, impliquant une relation fonctionnelle de type linéaire croissante. L'équation de régression s'écrit alors comme suit : $IRA = 1,156 IA + 12,73$.

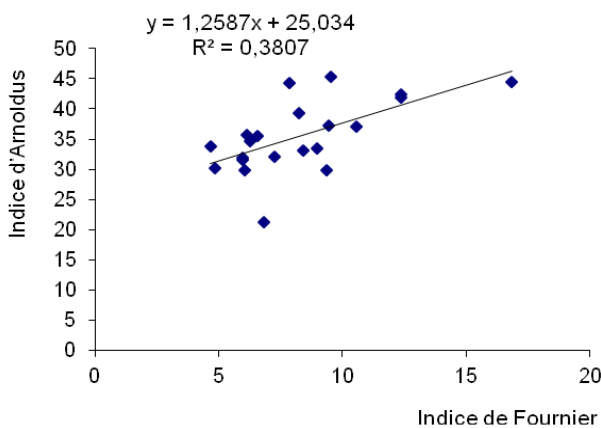


Figure 32 : Coefficient de détermination entre l'indice d'Arnoldus et de Fournier

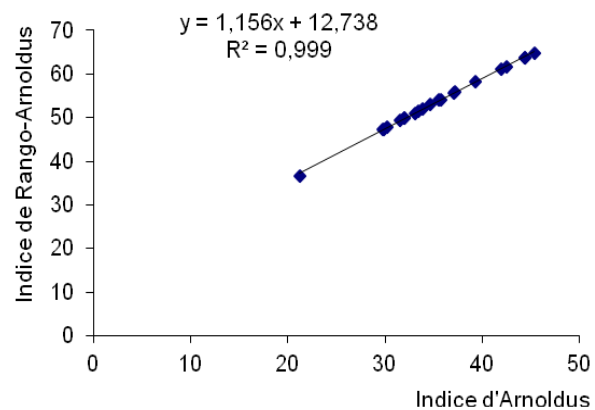


Figure 33 : Coefficient de détermination entre l'indice d'Arnoldus et de Rango-Arnoldus

5.1.3- Cartographie de l'érosivité des pluies dans le Tell oranais

Au moyen du logiciel Surfer, nous avons élaboré une carte de répartition de la pluie moyenne annuelle (figure 34) et les cartes d'érosivité des pluies selon les indices de Fournier, d'Arnoldus et de Rango-Arnoldus (les figures 35, 36, 37) et les cartes d'érosivité saisonnières de Deffontaines (les figures 38, 39, 40 et 41) correspondants respectivement aux quatre indices d'érosivité calculés précédemment à l'échelle du Tell oranais.

5.1.3.1- Carte de la pluviométrie

La progression vers une vision spatialisée et cartographiée de la pluviométrie, nous a permis de voir la variation de la pluviométrie en fonction du relief et de l'éloignement du littoral, la grande variabilité spatiale, qui rend l'hydrométéorologie de notre région d'étude hétérogène sur le plan spatial et temporel.

La pluviométrie moyenne annuelle de notre région oscille entre 200 mm et 400 mm. La distribution moyenne annuelle des précipitations diminue à mesure que l'on s'éloigne du littoral, avec une classe dominante de [300-350] qui couvre une superficie de 30.744,48 Km² soit 72,44 %, contre une très faible classe de [200-250] qui ne représente que 0,74 % avec une superficie de 313,64 Km².

Les deux classes [250-300] et [350-400] sont respectivement représentées par les superficies de 6.203,54 Km² soit 14,62 % et 5.178,34 Km² soit 12,20 % (figure 34). Cette dernière reçoit une quantité importante de pluies. Cependant, on remarque une tendance croissante des pluies sur les reliefs supérieurs comme les stations d'Ain Fares (806 m), de Freneda (990 m) et de Tiaret (675 m). La pluviométrie moyenne annuelle augmente selon deux principales directions à savoir de l'Ouest vers l'Est et du Sud vers le Nord. Notre région est située en latitude à l'abri de la dorsale du moyen Atlas-Rif du Maroc avec un relief très accidenté constituant de nombreux abris aux influences de la mer. Ces deux facteurs ont un effet direct sur la variabilité spatiale de la pluviométrie ainsi que sur la réduction des précipitations dans l'Ouest algérien.

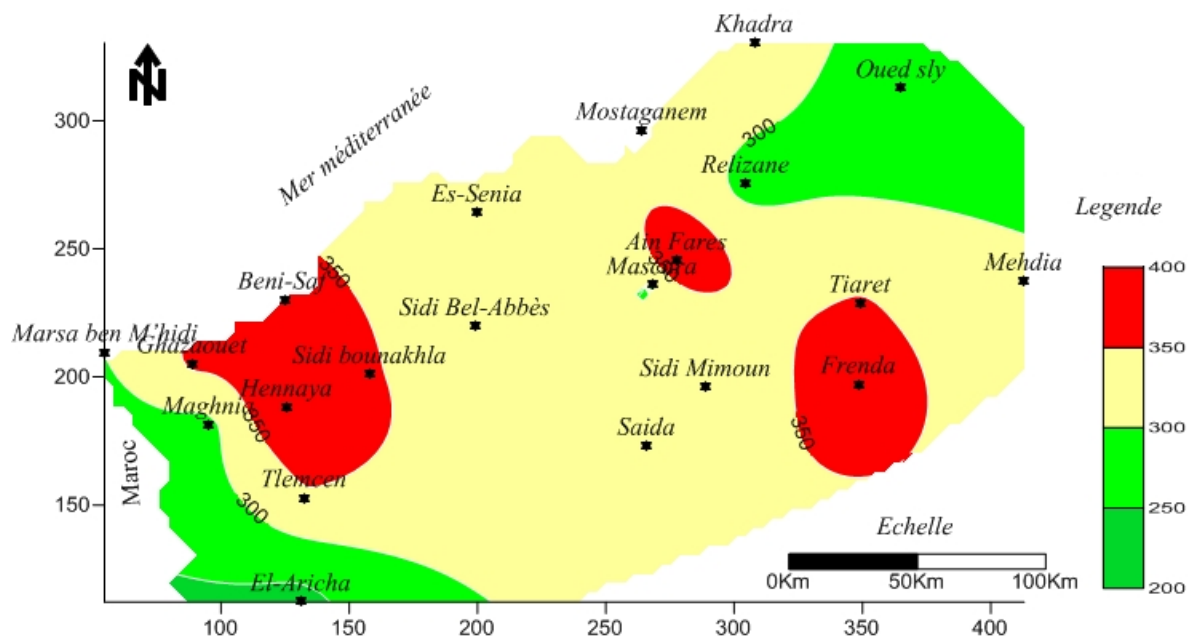


Figure 34 : Carte de répartition de la pluviométrie dans le Tell oranais

L'hétérogénéité spatiale de la quantité de pluie dérive de la complexité de la topographie locale qui peut se présenter sous différentes formes. L'influence de l'altitude sur la distribution géographique des précipitations est variée. Il y a une hausse des précipitations en fonction de l'altitude dans les stations exposées aux variations pluvieuses, avec une variation du gradient de l'Ouest vers l'Est. Quoi qu'il en soit, l'altitude n'est pas toujours le facteur le plus important dans la distribution géographique des précipitations. D'autres facteurs, tels que la distance de la station par rapport au

sommet, la position du relief par rapport à la mer, la morphologie de l'orographie jouent aussi un rôle important.

5.1.3.2- Carte d'érosivité des pluies selon l'indice de Fournier

La carte de répartition spatiale de l'indice de Fournier (figure 35), montre que le Tell oranais est couvert par deux classes d'érosivité, les stations du centre et du Sud sont caractérisées par une érosivité de la classe [1-10] couvrant une importante superficie de 34.765,43 Km² soit 81,91 % alors que les stations côtières ont une érosivité de la classe [10-20] avec une superficie de 7.674,57 Km² soit 18,09 %. Selon l'indice de Fournier, le risque érosif est situé dans les zones côtières.

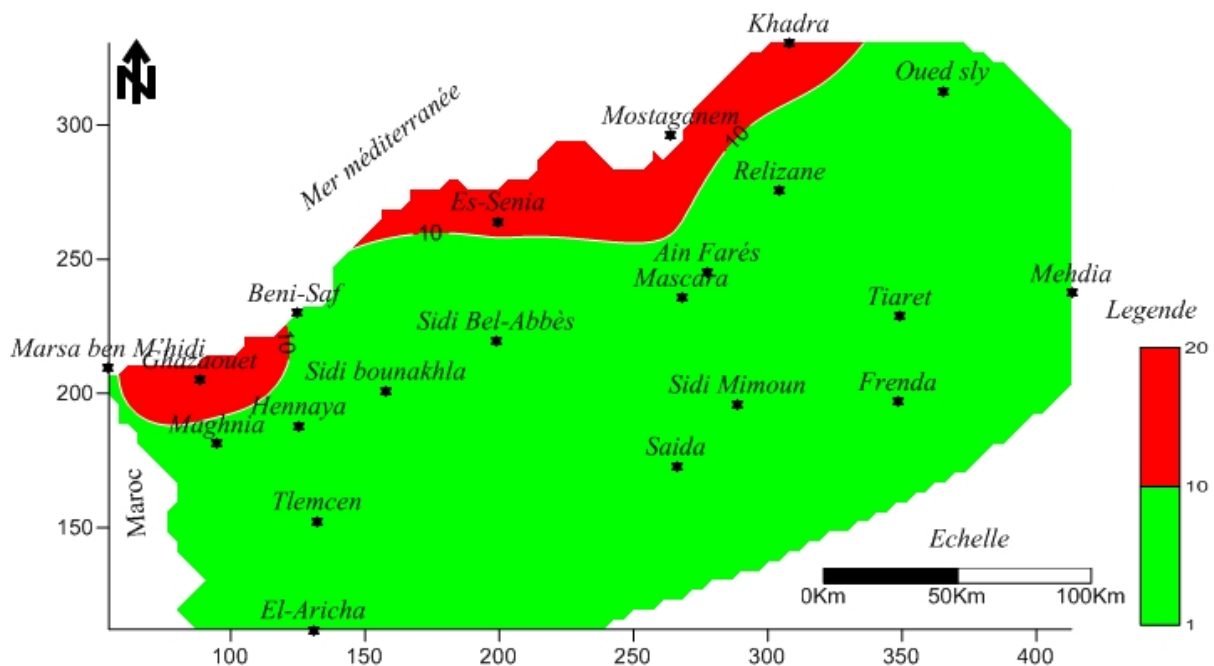


Figure 35 : Carte de répartition de l'érosivité des pluies selon Fournier dans le Tell oranais

5.1.3.3- Carte d'érosivité des pluies selon l'indice d'Arnoldus

La carte de répartition spatiale de l'indice d'Arnoldus (figure 36), montre que le Tell oranais est couverte par trois classes, Les stations du centre de notre région sont caractérisées par une érosivité moyenne dont la plus importante est la classe [30-40] sur une superficie de 36.117,76 Km², soit 85,10 % , suivie par les stations du Sud-Ouest qui enregistrent une faible érosivité de la classe [20-30] sur une superficie de 3.514,89 Km² soit 8,28 %.

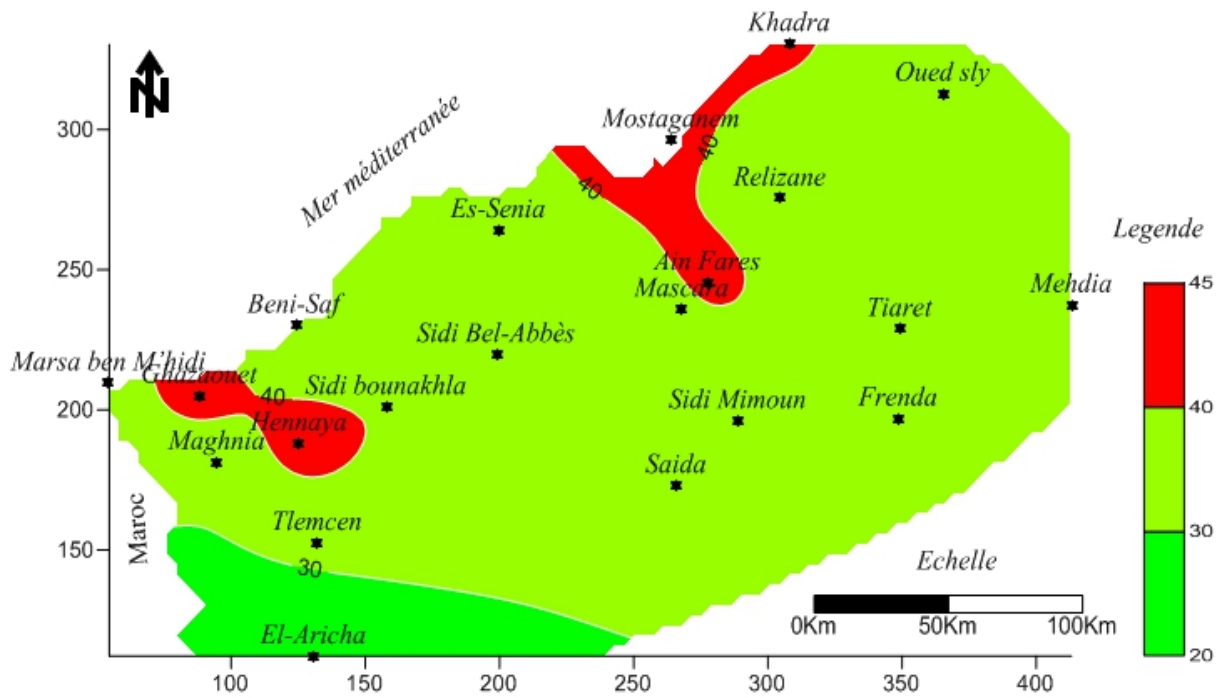


Figure 36 : Carte de répartition de l'érosivité des pluies selon Arnoldus dans le Tell oranais

Enfin, les stations du littoral qui enregistrent une érosivité des pluies relativement élevée dans la tranche de classe [40-45] sur une superficie de 2.807,35 Km² soit 6,62 %. L'indice d'Arnoldus confirme que l'érosivité est forte dans les zones qui sont proches du littoral et croit du Sud au Nord.

5.1.3.4- Carte d'érosivité des pluies selon l'indice de Rango-Arnoldus

La carte de répartition spatiale de l'indice d'érosivité des pluies de Rango-Arnoldus montre une érosivité forte [55-65] représenté par la surface de 8.655,21 Km² soit 20,39 %, alors que la classe [45-55] est représenté par une importante superficie de 31.846,97 Km² soit 75,04 %,

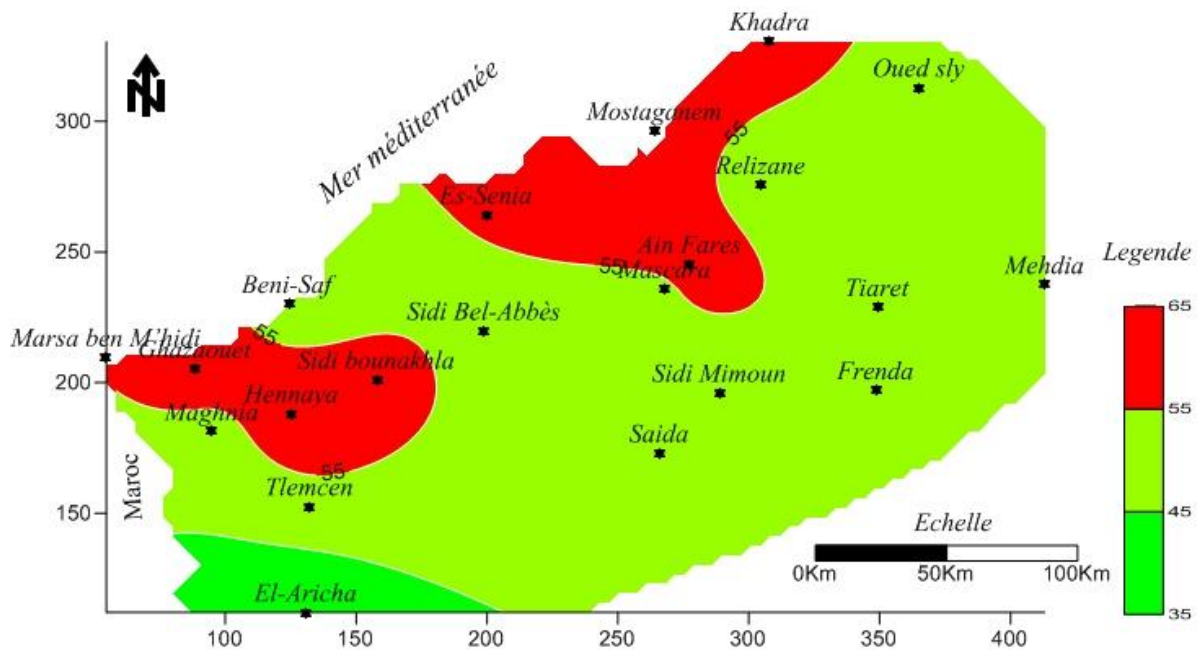


Figure 37 : Carte de répartition de l'érosivité des pluies selon Rango-Arnoldus dans le Tell oranais

la zone Sud-Ouest représenté par la classe faible érosivité [35-45] avec une faible superficie de 1.941,01 Km² soit un pourcentage de 4,57 % (figure 37). L'agressivité des pluies dans notre région augmente du Sud vers le Nord et de l'Ouest vers l'Est.

5.1.3.5- Cartes saisonnières d'érosivité des pluies selon l'indice de Deffontaines

La mise au point d'une cartographie saisonnière permet de connaître l'importance de l'érosivité des pluies au cours des différentes périodes de l'année, on s'est intéressé aux cartes saisonnières (automne, hiver, printemps et été), ce qui nous a permis d'étudier en plus l'érosivité des pluies dans le temps et dans l'espace. Les cartes d'iso-érosivité basées sur l'indice de Deffontaines (figures 38, 39, 40 et 41), montrent une variation remarquable de l'érosivité d'une saison à l'autre.

5.1.3.5.1- Carte d'érosivité des pluies en Automne

La figure 38 montre que l'érosivité des pluies en automne est élevée dans les stations de Marsa Ben M'hidi, et Ghazaouet avec une classe de [90-100], mais elle couvre une petite superficie de 202,13 Km², soit 0,48 %. La classe [60-90] couvre une superficie de 4.118, 26 Km² soit 9,70 % et qui englobe les stations d'Es-Senia, de Mostaganem et de Khadra, alors que les trois stations comme Mascara, Saida et El Aricha appartiennent à la classe [30-60] sur une surface de 13.674,17 Km² soit 32,22 %. Le reste des stations du Tell oranais appartient à la classe de faible d'érosivité de [0-30] qui occupent plus la moitié de superficie de la région avec 24.445,44 Km² soit 57,60 %.

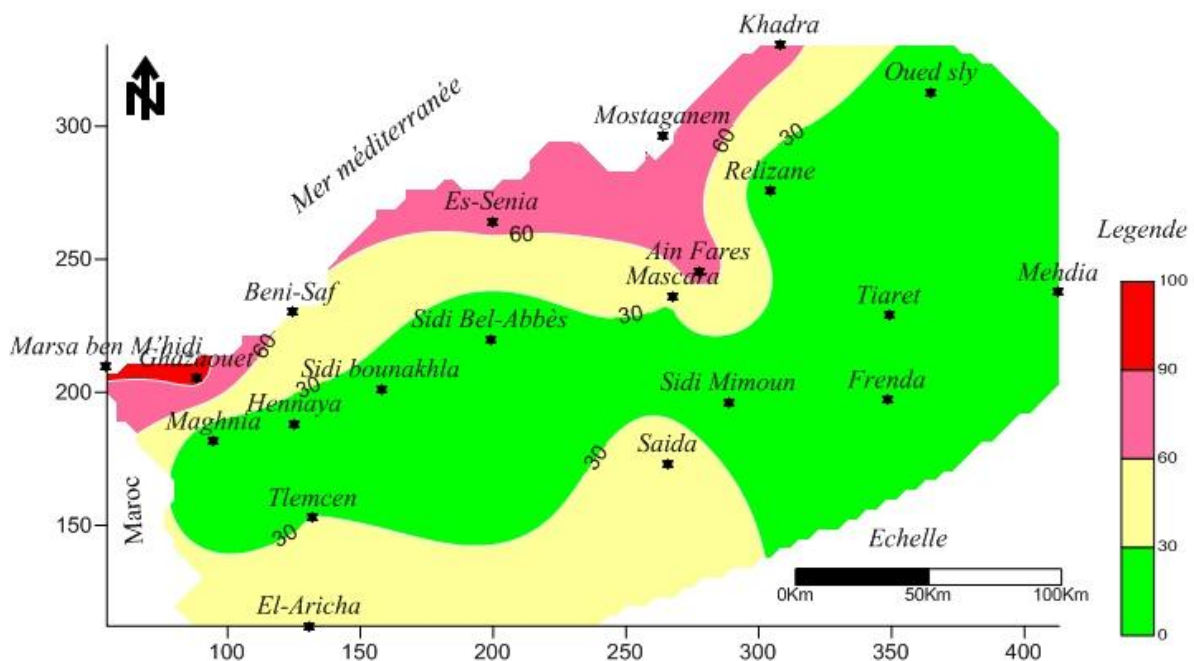


Figure 38 : Carte de répartition de l'érosivité en Automne selon Deffontaines dans le Tell Oranais

5.1.3.5.2- Carte d'érosivité des pluies en Hiver

La carte d'érosivité des pluies en hiver montre les mêmes tendances observées en automne à savoir : une forte érosivité dans les zones côtières telles que les stations de Marsa Ben M'hidi et Ghazaouet et une moyenne à faible érosivité pour les zones du centre et du Sud (figure 39).

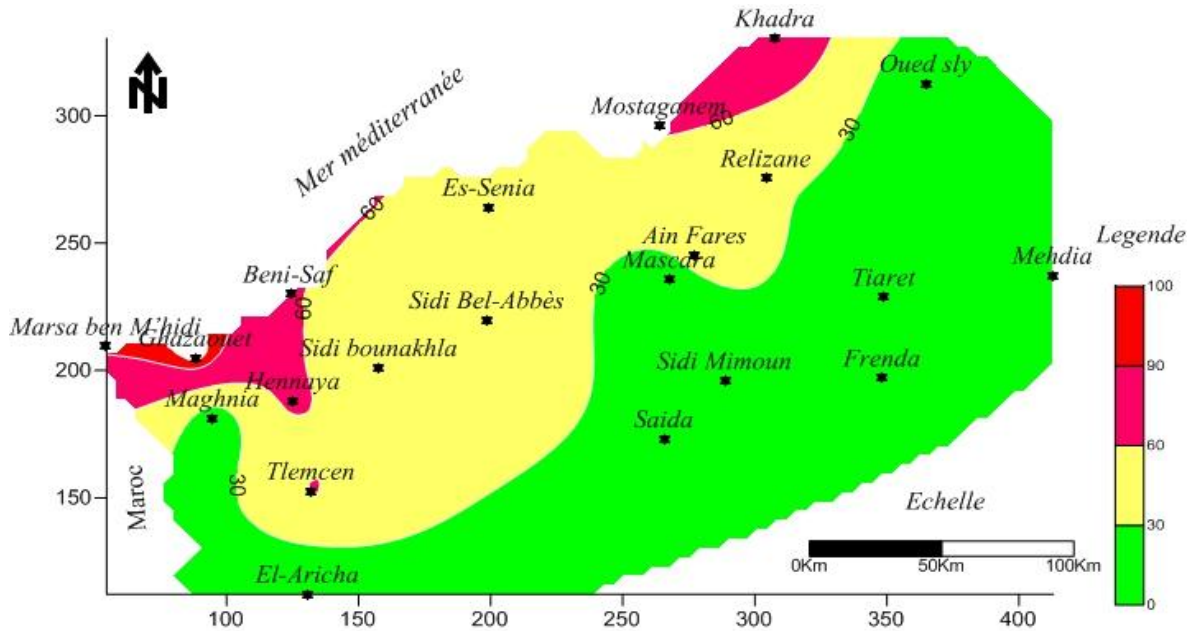


Figure 39 : Carte de répartition de l'érosivité en Hiver selon Deffontaines dans le Tell Oranais

Par ailleurs, on a enregistré une érosivité de pluies des classes [90-100] et [60-90] sur une faible superficie respectivement de 214,03 Km², soit 0,51 % et 2.321,46 Km² soit 5,47 %. Les stations du centre du Tell oranais appartiennent à la classe [30-60] avec une surface de 16. 800,33 Km² soit 39,68 % alors que les stations du Sud sont caractérisées par une faible érosivité : classe [0-30] sur une surface de 23. 104,33 Km², soit 54,44 %.

5.1.3.5.3- Carte d'érosivité des pluies au Printemps

Au printemps, l'érosivité des pluies est élevée (classe [60-90]) aux stations de Marsa Ben M'hidi, de Ghazaouet, d'Es-Senia, d'Ain Fares, de Mostaganem et de Khadra sur une superficie de 4.004,14 Km², soit 9,44 % (figure 40). Les stations de Beni-Saf, de Mascara, de Saïda et d'El Aricha appartiennent à la classe [30-60] sur une superficie de 13.508,74 Km², soit 31,83 %. Le reste des stations ont une faible érosivité de la classe [0-30] sur une superficie de 24.925,01 Km², soit 58,73 %.

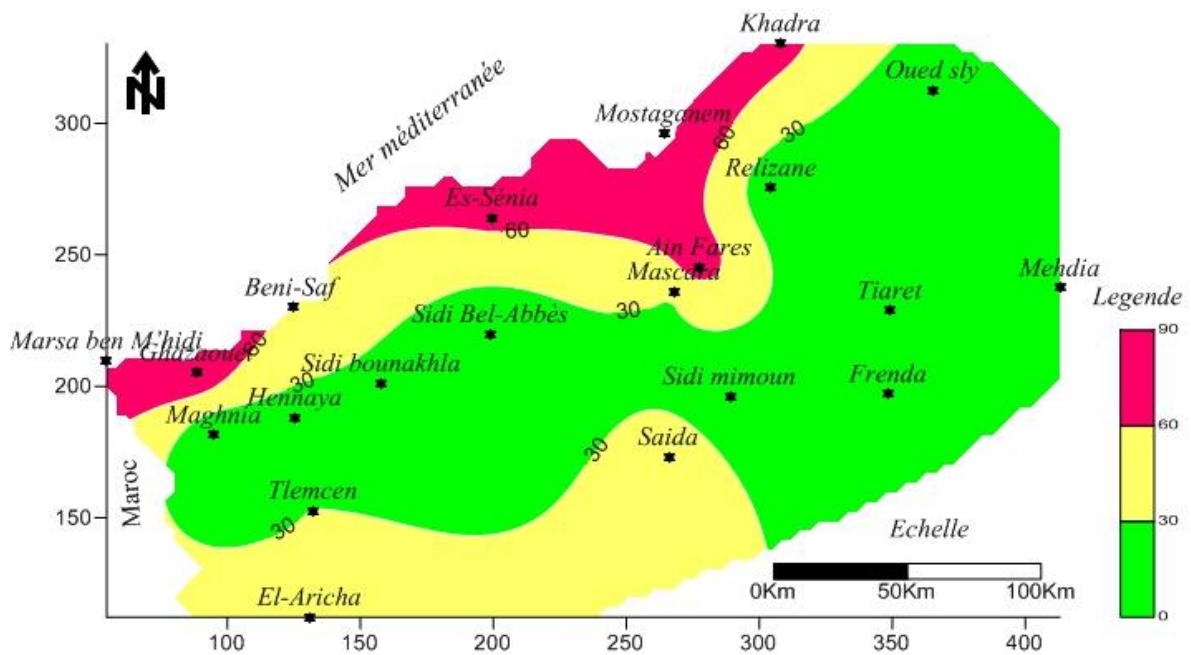


Figure 40 : Carte de répartition de l'érosivité au Printemps selon Deffontaines dans le Tell Oranais

5.1.3.5.4- Carte d'érosivité des pluies en Été

En été, on a enregistré une seule classe de faible érosivité, cette classe de [0-15] occupe l'ensemble du Tell oranais avec 42.440 Km², soit 100 % (figure 41).

Cette dernière est dominante dans notre région d'étude vu les caractéristiques du climat méditerranéen (très faible précipitation en été).

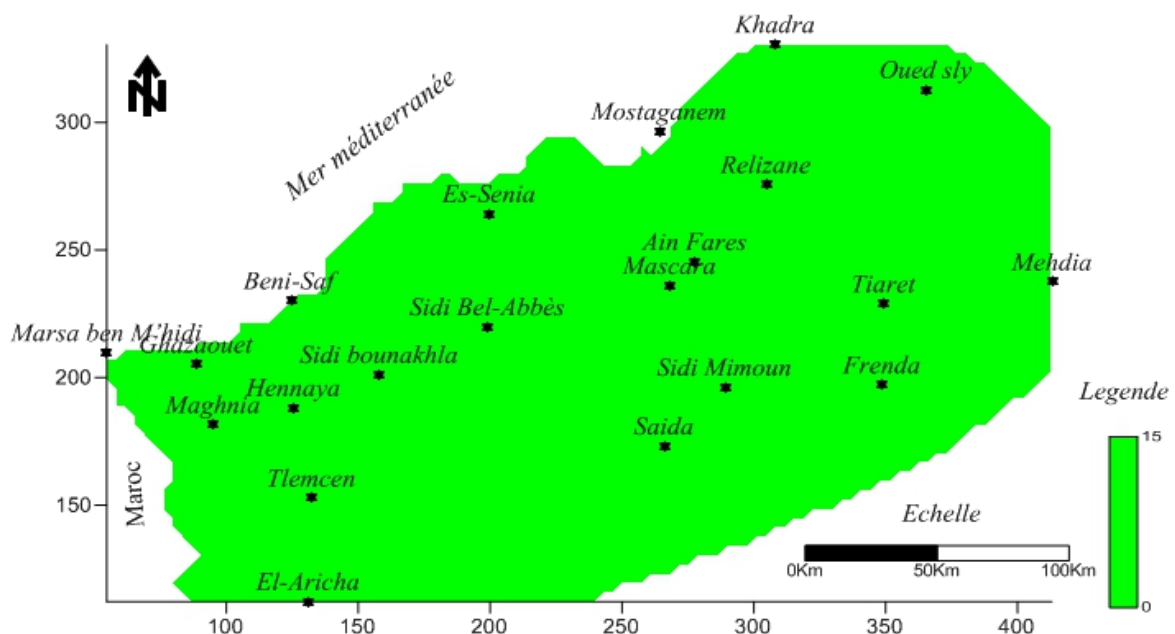


Figure 41 : Carte de répartition de l'érosivité en Été selon Deffontaines dans le Tell Oranais

Les cartes saisonnières du Tell oranais, nous renseignent que les pluies sont plus agressives en automne et en hiver, on observe aussi une augmentation de l'érosivité du Sud vers le Nord dans le Tell oranais.

Conclusion

Dans le Tell oranais, la forte érosivité coïncide généralement avec les mois pluvieux par contre, les mois qui coïncident avec la sécheresse subissent aussi une érosivité grâce à des événements pluvieux torrentiels rares limités dans l'espace et dans le temps. La coïncidence de la répartition des indices d'érosivité des pluies semble indiquer des liaisons très étroites entre l'agressivité des pluies et les régimes pluviométriques. Plus de 72 % de la superficie du Tell oranais est dominée par la tranche pluviométrique moyenne de la classe [300-350].

La tranche d'érosivité des pluies élevées selon l'indice de Fournier est de [10-20] qui couvre une superficie de 18 %. Pour l'indice d'Arnoldus, la tranche d'érosivité de [40-45] est élevée et couvre une faible superficie de 7 %, alors pour Rango-Arnoldus, la tranche d'érosivité des pluies élevées [55-65] représente une superficie de 20 %.

Les cartes d'érosivité mensuelles de Deffontaines montrent une variation du degré d'érosivité entre les différentes saisons, ce qui confirme l'irrégularité des précipitations dans le Nord-Ouest algérien. La classe d'érosivité des pluies la plus élevée [90-100] est enregistrée durant les saisons d'automne et d'hiver sur une superficie successivement de 0,48 % et 0,51 %. Au printemps, la classe risquée est de tranche [60-90] sur une surface de 9 %, concernant la saison d'été l'érosivité des pluies est nulle. A cet effet, l'érosivité des pluies est forte durant l'automne et l'hiver alors qu'elle est moyenne durant le printemps et nulle durant l'été.

L'analyse des cartes d'érosivité des pluies est intéressante, puisqu'on retrouve bien à travers ces champs de précipitation ce que l'on connaît des grands types de variation du risque d'érosion à l'échelle du Tell oranais.

5.1.4- Etude de l'érodibilité des sols à l'échelle de deux zones test

5.1.4.1- Analyse physico-chimique

- Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique montre que les échantillons étudiés possèdent une teneur en argile qui varie de 13,3 % à 46,1 % dans l'embouchure du Chélif et de 14,7 % à 51 % pour la partie occidentale du bassin versant de l'Oued Mina. Alors qu'on remarque que les échantillons prélevés dans les deux zones ont une proportion d'argiles presque identique (tableau 19).

Dans l'embouchure du Chélif, les échantillons de marnes vert-clair sont caractérisés par une proportion élevée de limon (57,4 %), et ceux de marnes bleues contiennent 34,4 % de limon. Dans la partie occidentale du bassin versant de l'Oued Mina, le taux de limon atteint 44,5 % pour les marnes brunes et 22,9 % pour les marnes bleues compactes et calcaires.

Le taux de sable grossier est élevé avec une valeur de 47,2 %, il est enregistré dans les marnes bleues. Pour les autres échantillons de deux zones test, ce taux est faible sauf les marnes bleues compactes et calcaires, le sable grossier représente 15,9 %. Nous signalons que la proportion de sable fin est élevée dans les échantillons de la partie occidentale du bassin versant de l'Oued Mina mais elle est faible pour les échantillons de l'embouchure du Chélif.

Tableau 19 : Résultats d'analyse granulométrique des échantillons

Ech.	Granulométrie (%)					Texture	Structure
	A 0 - 2 μ	L.F 2-20 μ	L.G 20-0 μ	S.F 50-100 μ	S.G 100-2000 μ		
1	37	17,2	40,2	1,8	3,6	Limono- argileuse	Fin à moy. grumeleuse
2	13,3	6,7	27,7	4,9	47,2	Limono- sableuse	Grumeleuse
3	32,7	13,4	36,9	8,1	8,7	Limono- argileuse	Fin à moy. grumeleuse
4	45,31	22,2	14,7	14,1	2,9	Argileuse	olyédrique à prismatique
5	15,7	37,8	18,5	23,3	4,7	Limoneuse	Grumeleuse
6	37,2	35,2	2,3	18,9	5,1	Limono-argileuse	Fin à moy. grumeleuse
7	45,1	42,6	1,9	3,4	6,4	Argilo-limoneuse	Sub-polyédrique
8	34	33	4,4	19,9	8,9	Limono-argileuse	Grumeleuse
9	51	19,9	3,0	10,0	15,9	Argileuse	Polyédrique à prismatique
10	44,9	19,3	15,2	15,1	4,9	Argileuse	Polyédrique
11	48,6	21,9	8,3	18,6	2,5	Argileuse	Polyédrique

- Texture

Le triangle textural montre que les échantillons d'embouchure du Chélif ont une texture limono-sableuse, limoneuse, limono-argileuse à argileuse et les échantillons de la partie occidentale du bassin versant de l'Oued Mina sont de texture du type limono-argileuse, argilo-limoneuse à argileuse (figure 43 et tableau19).

- pH

Les échantillons de deux zones test présentent un pH basique variant entre 7,1 et 8,6 donc ils sont calcaires (Tableau 20).

- Azote

La proportion de l'azote est faible (< 1 %) pour l'ensemble des échantillons.

- Matière organique

Les échantillons de l'embouchure du Chéiff ont une teneur en matière organique comprises entre 2,12 % à 5,31 %, alors que cette teneur varie de 0,76 % à 2,70 % dans la partie occidentale du bassin versant de l'Oued Mina.

- La conductivité électrique

La conductivité électrique varie de 0,19 à 1,3 mmhos pour les échantillons de l'embouchure du Chéiff et entre 1,21 à 2,36 mmhos pour les échantillons de la partie occidentale du bassin versant de l'Oued Mina.

L'échelle de salure de la relation de Richards in Aubert (1978), montre que les échantillons de l'embouchure du Chéiff sont peu salés alors que les échantillons de la partie occidentale du bassin versant de l'Oued Mina sont salés (figure 42).

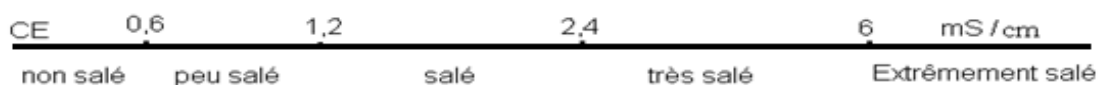


Figure 42 : Echelle de salure en fonction de la conductivité de l'extrait aqueux au 1/5

- Carbonate de Calcium CaCO₃

L'influence du carbonate de calcium (CaCO₃) est très importante sur le comportement mécanique des marnes, et ne représente qu'une proportion très variée de 3,24 % à 40,33 %. En effet, nous enregistrons un faible taux de CaCO₃ dans les marnes bleues avec 3,24 % et un taux élevé avec 16,21 % pour les marnes vert- clair dans l'embouchure du Chéiff. Dans la partie occidentale du bassin versant de l'Oued Mina, ce taux est faible dans les marnes grises (9,7 %) et est élevé (40,33 %) dans les marnes bleues compactes et calcaires (tableau 20). Cette forte teneur se trouve liée à la nature de la roche mère qui est souvent calcaire.

Tableau 20 : Résultats d'analytique chimique et physique et le comportement des échantillons

Ech.	Analyses biochimiques (%)				pH	C.E mmhos/25°	CaCo ₃	Bases échangeables (meq /100 g)			
	C.O	M.O	N	C/N				Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺
1	2,39	4,12	0,07	34,14	7,8	0,70	16,21	13,30	3,23	1,35	0,48
2	3,08	5,31	0,04	77	7,9	1,30	3,24	9,50	2,41	0,48	2,56
3	2,57	4,43	0,03	85,6	8,2	1,30	14,00	12,16	2,14	1,73	3,07
4	1,32	2,28	0,12	11,0	8,8	0,36	14,31	15,12	2,71	0,54	0,62
5	1,62	2,79	0,08	20,25	8,6	0,19	9,55	10,10	4,31	0,82	1,54
6	1,33	2,30	0,09	14,77	7,1	2,01	9,70	11,41	3,61	1,42	0,24
7	1,74	2,00	0,05	34,8	7,6	-	10,11	23,21	5,93	0,92	0,59
8	1,22	2,10	0,08	15,25	7,8	2,36	31,17	8,84	6,41	0,82	8,32
9	1,57	2,70	0,11	14,27	7,5	1,21	40,33	26,80	-	1,32	0,12
10	0,73	1,26	0,09	8,11	8,4	1,22	24,91	12,60	4,48	1,15	0,29
11	1,56	2,68	0,14	11,14	8,6	1,32	23,55	24,60	5,36	1,08	0,13

- Bases échangeables

Les cations dans nos échantillons d'embouchure du Chélif (tableau 20) sont caractérisés par une proportion faible de Calcium avec 9,5 méq/100g dans les marnes bleues alors qu'il atteint 15,12 méq/100g dans les sols bruns vertiques sur marne. Dans la partie occidentale du bassin versant de l'Oued Mina, ce taux est varié de 8,84 méq/100g (marnes vert-clair armées de grès) et de 26,80 méq/100g (marnes bleues compactes et calcaires).

Le taux de Magnésium varie de 2,14 méq/100g à 4,31 méq/100g dans les échantillons d'embouchure du Chélif et dans la partie occidentale du bassin versant de l'Oued Mina, ces cations de Magnésium varient entre 3,61 méq/100g à 6,41 méq/100g.

Le potassium dans les 11 échantillons est faible, il varie de 0,48 méq/100g dans les marnes bleues et 1,73 méq/100g dans les marnes vert-clair jaunâtres.

La faible quantité de Sodium (Na⁺) enregistré est inférieure à 3,07 méq/100g pour l'ensemble des échantillons sauf pour les marnes vert-clair armées de grès (8,32 méq/100g).

Tableau 21 : Résultats d'analyses physiques et le comportement des échantillons

Ech.	Log ₁₀ Is(S.St)	Stabilité structurale	Degré de plasticité	Aptitude à la fissuration	IB	Sensibilité à la Battance	Perméabilité (mm/h)
1	1,4	Médiocre	Plastique	Moyenne	0,51	Risque faible	Modérée à lente
2	2,0	Instable	Plastique	Aucune	0,26	Risque élevé	Modérée
3	1,8	Instable	Plastique	Moyenne	0,42	Risque faible	Modérée à lente
4	1,07	Stable	Plastique	Excellente	0,42	Risque très faible	Très lente
5	2,15	T. instable	Plastique	Aucune	1,71	Risque élevé	Modérée
6	1,15	Stable	Plastique	Moyenne	0,71	Risque faible	Modérée à lente
7	1,3	Stable	Plastique	Excellente	0,67	Risque très faible	Lente
8	1,6	Médiocre	Moy. plastique	Moyenne	0,76	Risque faible	Modérée à lente
9	1,25	Stable	Plastique	Excellente	0,21	Risque très faible	lente
10	1,3	Stable	Moy. plastique	Excellente	0,52	Risque très faible	lente
11	1,02	Stable	Plastique	Excellente	0,47	Risque faible	lente

- Sensibilité à la Battance des échantillons

Le triangle textural (figure 43), indique les classes de sensibilité des échantillons à la battance :

- Les échantillons moins sensibles à la battance (risque très faible) sont les sols bruns vertiques sur marnes, les marnes brunes, les marnes bleues compactes-calcaires et les marnes brunes armées de calcaire.
- Les échantillons à faible risque de battance sont les marnes vert-clair, les marnes vert-clair jaunâtres, les marnes grises, les marnes vert-clair armées de grès et les sols calcaires et marnes.
- Les échantillons présentant un risque élevé de battance sont les marnes bleues et le sol peu évolué d'apport alluvial.

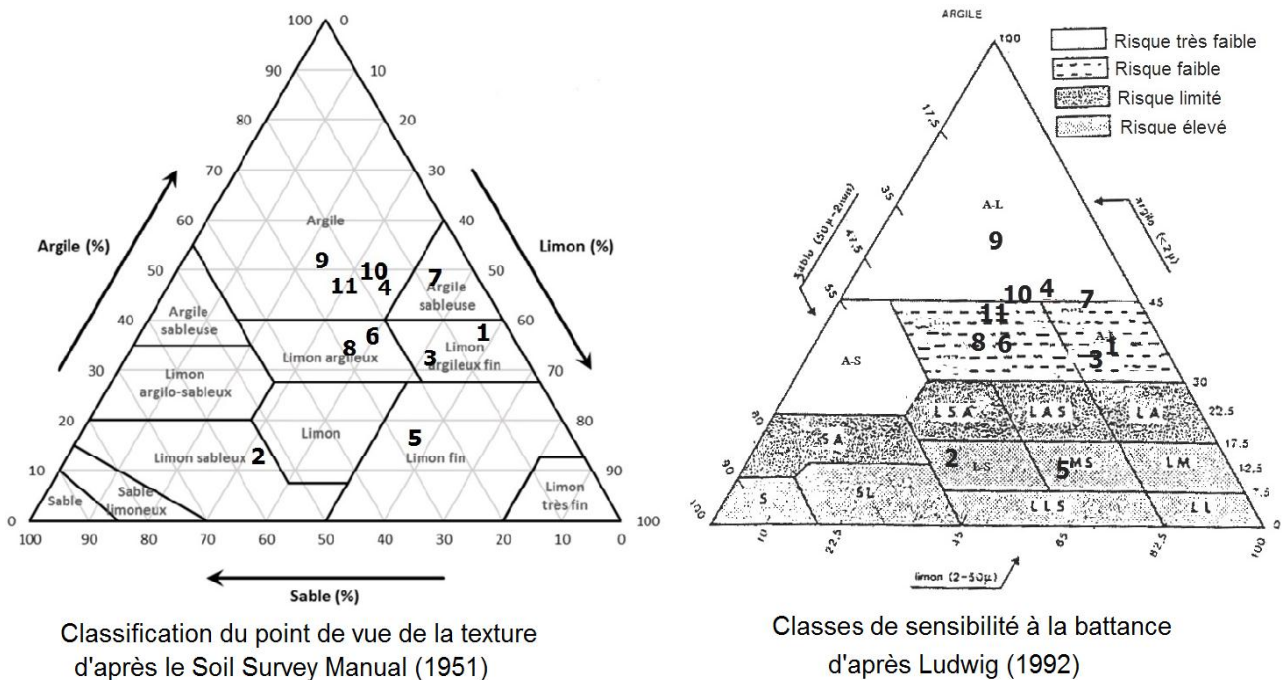


Figure 43 : Triangles de classification de nos échantillons du point de vue de la texture et de la sensibilité à la battance

- Stabilité structurale

Selon le triangle textural, les échantillons stables sont les marnes vert-clair, les marnes vert-clair- jaunâtres, le sol brun vertique sur marnes, les marnes brunes, les marnes bleues compactes-calcaires, les marnes brunes-calcaires et le sol calcaire-marnes (figure 44). Les échantillons moyennement stables sont les marnes grises et les marnes vert-clair armées de grès. Les marnes bleues est instable et le sol peu évolué d'apport alluvial est très instable.

- Aptitude à la fissuration

Cette propriété exprime l'aptitude intrinsèque d'un matériau à se fragmenter sous l'effet des alternances humectation-dessiccation.

Le résultat est présent sous la forme d'un triangle textural renseigné en classes d'aptitude à la fissuration. Il en ressort que ce dernier est :

- Excellente aptitude à la fissuration pour le sol brun vertique sur marne, les marnes brunes, les marnes bleues compactes et calcaires, les marnes brunes armées de calcaire et le sol calcaire et marnes.
- Moyenne aptitude à la fissuration pour les marnes vert-clair, les marnes vert-clair jaunâtres, les marnes grises et les marnes vert-clair armées de grès.
- Aucune fissuration pour les marnes bleues et le sol peu évolué d'apport alluvial (figure 44).

Dans les marnes sensibles à la fissuration, des fentes se développent durant la période de sécheresse. Durant la période pluvieuse, l'eau s'engouffre dans les fentes jusqu'au niveau imperméable.

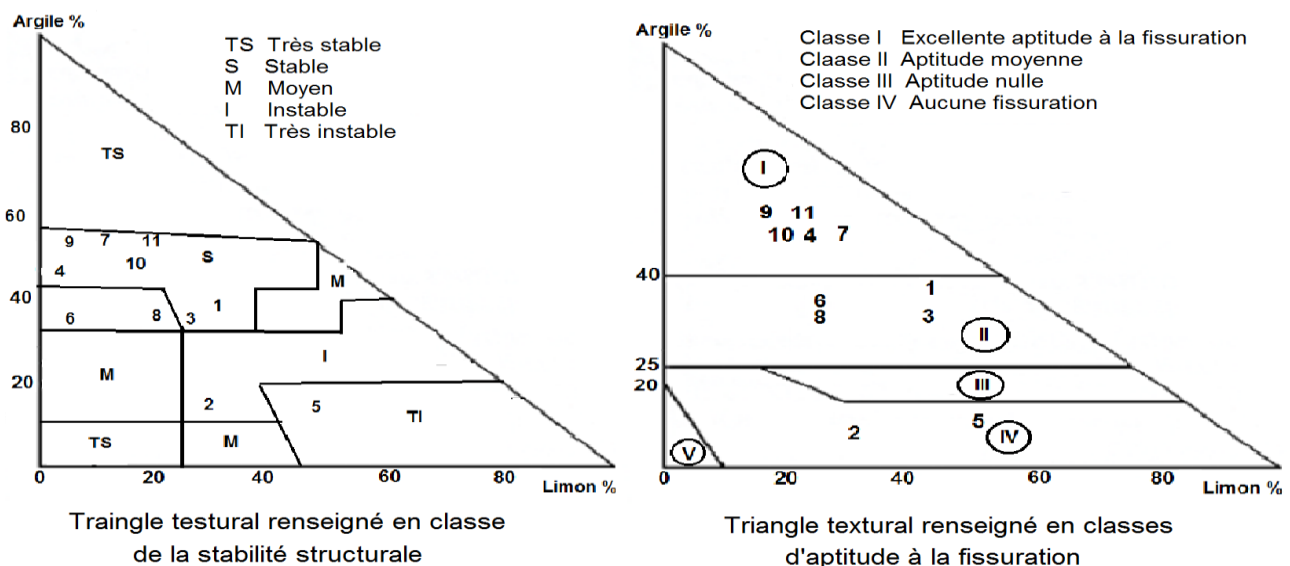


Figure 44 : Triangles texturales renseignés en classe de stabilité structurale et d'aptitude à la fissuration d'après Monnier et Stengel (1982)

- Analyse minéralogique des argiles

L'analyse minéralogique des échantillons aux rayons X, montre que les argiles de l'embouchure du Chélif, sont riches en illite avec une proportion qui varie de 25 % dans le sol peu évolué d'apports alluvial et de 38 % dans les marnes vert-clair. La teneur en kaolinite est représentée par des proportions respectives de 12 % dans le sol brun vertique et de 35 % dans les marnes vert-clair. La montmorillonite est représentée par une proportion de 56 % dans le sol brun vertique sur marnes et faible proportion dans les marnes vert-clair avec 27 % (en annexes). Nous signalons que le taux de chlorite est nul dans ces échantillons (tableau 22).

Tableau 22 : Résultats d'analyse minéralogique des échantillons

Ech.	Minéraux argileux (%)			
	Illite	Chlorite	Kaolinite	Montmorillonite(Interstratifiés)
1	38	-	35	27
2	31	-	32	37
3	33	-	31	36
4	32	-	12	56
5	25	-	30	45
6	35	25	10	30
7	30	15	10	45
8	10	+	15	75
9	35	30	10	25
10	30	-	+	70
11	30	-	15	55

+: traces

Les échantillons de la partie occidentale du bassin versant de l'Oued Mina sont dominés par des produits de transformation d'illites et de chlorite dégradés sous forme des interstratifiés. Ils peuvent être considérés comme des édifices proches des smectites gonflantes. Ces dernières sont particulièrement abondantes dans les marnes brunes armées de calcaire avec 70 % et dans les marnes vert-clair armées de grès avec 75 %. Ces marnes sont riches en argiles très mal cristallisées et gonflantes, sensibles aux phénomènes gonflement-retrait et favorisant l'apparition de fentes de retrait dans la plupart des sols de la zone. L'absorption de l'eau et le gonflement qui favorise l'altération suite à l'alternance des phases d'humectation et de dessiccation. Pour les marnes grises et marnes bleues compactes et calcaires, le taux de l'illite est d'ordre 35 % et on trouve la Chlorite dans quelques échantillons tels que les marnes brunes avec 30 %, les marnes vert-clair armées de grès avec 25 % et les marnes bleues compactes et calcaires avec 15 %. La teneur en kaolinite est faible pour tous les échantillons de la partie occidentale du bassin versant de l'Oued Mina et on trouve du chlorite sous forme des traces dans les marnes vert-clair armées de grès.

On remarque que les marnes vert-clair, grises et bleues compactes et calcaires ont une faible érodibilité grâce à la proportion élevée de leur illite et la faible proportion des interstratifiés. Par contre, les marnes vert-clair armées de grès et brunes armées de calcaire sont érodibles à cause de la dégradation de ses minéraux argileux.

L'illite et la kaolinite sont présentes dans tous les échantillons, mais l'illite en proportion plus élevée que la kaolinite. La chlorite est présent dans les échantillons de la partie occidentale du bassin versant de l'Oued Mina et absente dans les échantillons de l'embouchure du Chélif. La montmorillonite est présente dans les échantillons de l'embouchure du Chélif, et sous forme d'interstratifiés (illite-montmorillonite) dans la partie occidentale du bassin versant de l'Oued Mina.

- Facteur d'érodibilité k

L'utilisation de l'équation de Wischmeier et *al.*(1971) pour calculer le facteur d'érodibilité k, nous a permis de prévoir la sensibilité des marnes à l'érosion à partir des caractères intrinsèques, ces valeurs de l'indice d'érodibilité des échantillons varient de 0,14 pour les sols résistants tels que les marnes bleues compactes et calcaires à 0,58 pour les sols fragiles tels que les sols peu évolués d'apport alluvial (tableau 23). Selon la grille d'interprétation des facteurs k, les marnes bleues compactes-calcaires et les sols calcaires sur marnes appartiennent à la classe [0,10-0,20], ce qui signifie que les deux échantillons sont des sols moyennement érodibles alors que les marnes vert-clair, les marnes vert-clair-jaunâtres et les sols peu évolués d'apport alluvial sont dans la classe [0,40-0,60] donc ces trois échantillons sont des sols très fortement érodibles. Le reste de nos échantillons appartiennent à la classe [0,20-0,40], ce que signifie que ces échantillons sont des sols fortement érodibles. Selon ces résultats, on remarque que l'érodibilité est moyenne sur les substrats calcaires, alors qu'elle est élevée sur les sols limoneux.

5.1.4.2- Analyses mécaniques

- Limites d'Atterberg

Les résultats obtenus pour la limite de liquidité (WL), la limite de plasticité (WP) et l'indice de plasticité (IP) montrent que la limite de liquidité des échantillons varie entre 30,31 % pour les marnes grises et 50,13 % pour les marnes brunes armées de calcaire. La limite de plasticité varie de 20,72 % pour les marnes vert-clair-jaunâtres à 28,76 % pour les marnes vert-clair. L'indice de plasticité varie de 09,51 % pour les marnes grises à 24,78 % pour le sol brin verticale sur marnes (tableau 23).

L'abaque de plasticité de Casagrande (figure 45) met en valeur la limite de liquidité WL en fonction de l'indice de plasticité IP, cet abaque montre que nos échantillons testés appartiennent aux argiles moyennement plastiques à part les marnes vert-clair, les marnes bleues compactes-calcaires et le sol calcaire et marnes se situent dans des sols organiques très plastiques. Cet abaque est divisé par la ligne A en deux zones, les sols gonflants se plaçant au-dessus et les sols non gonflants en dessous.

Seed et *al.* (1962), proposent une classification du potentiel de gonflement du substrat en fonction de l'indice de plasticité. L'indice de plasticité des marnes grises est inférieur à 10, donc son potentiel de gonflement est faible. Les marnes vert-clair, les marnes bleues, les marnes vert-clair jaunâtres, les sols peu évolués d'apport alluvial, les marnes brunes, les marnes bleues compactes et calcaires et sols calcaires ont un indice de plasticité compris entre 10 et 20, donc leur potentiel de gonflement est moyen.

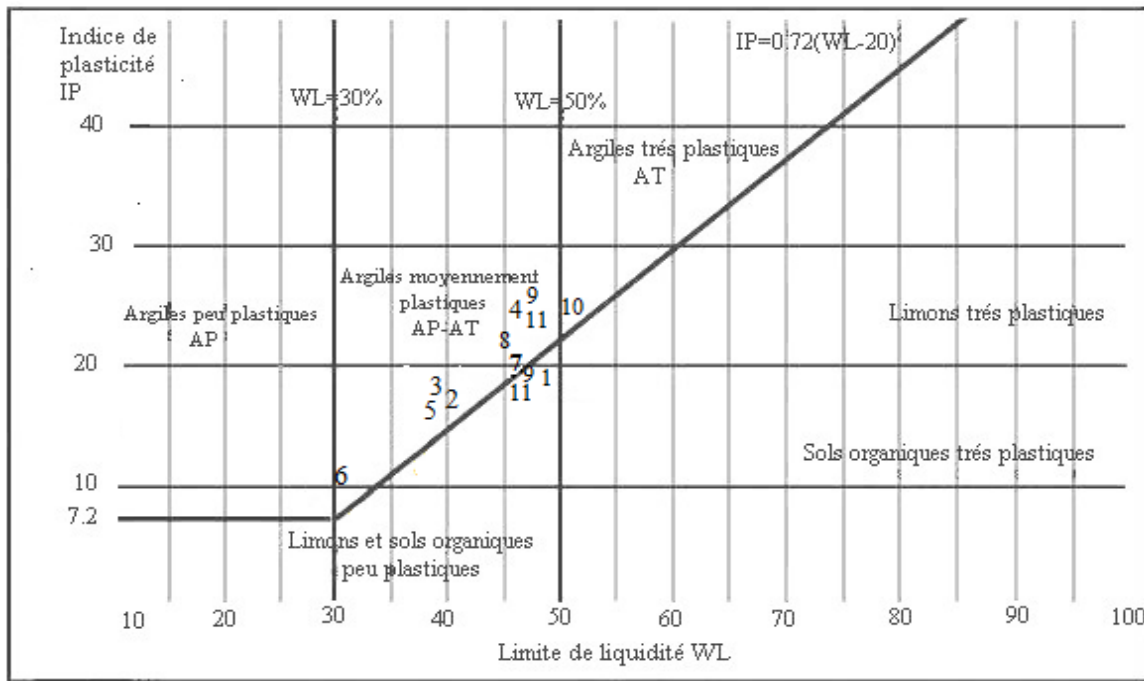


Figure 45 : Position de nos échantillons dans l'Abaque de Casagrande

Le sol brun vertique sur marnes, les marnes vert-clair armées de grès et les marnes brunes armées de calcaire ont un indice de plasticité compris entre 20 et 35, donc un potentiel de gonflement est élevé.

- Essais au cisaillement à la boîte de Casagrande

Nos échantillons sont soumis aux forces de cisaillement selon la boîte de Casagrande. La droite de la loi de Coulomb est $r = C + \sigma \text{Tg}(\Phi)$, sous forme $y = ax + b$; nous avons obtenu les résultats suivants : la courbe intrinsèque est une droite qui ne passe pas par l'origine.

Les caractéristiques mécaniques déterminées en cisaillement direct à la boîte montrent que les échantillons de marnes étudiées présentent des angles de frottement variant entre $21,55^\circ$ pour le sol calcaire et marnes à texture argileuse et $41,66^\circ$ pour les marnes bleues à texture limono-sableuse, soit une plage de 20° environ. En outre, elles présentent des cohésions très différentes variant entre 0,30 bars pour les marnes bleues et 0,56 bars pour le sol brun vertique sur marnes (figure 46) soit une plage de 0,20 bars. L'angle de frottement diminue lorsque la cohésion augmente.

Six échantillons (1, 2, 3, 5 et 8) ont une cohésion variant de 0,30 bars à 0,35 bars et ils sont caractérisés par une texture limoneuse à limono-argileuse. Cet intervalle donne une cohésion faible entre les particules de substrat à cause de l'élévation de la proportion de limon et l'abaissement de la proportion d'argile. La faible cohésion ne permet pas au sol de résister aux forces de ruissellement.

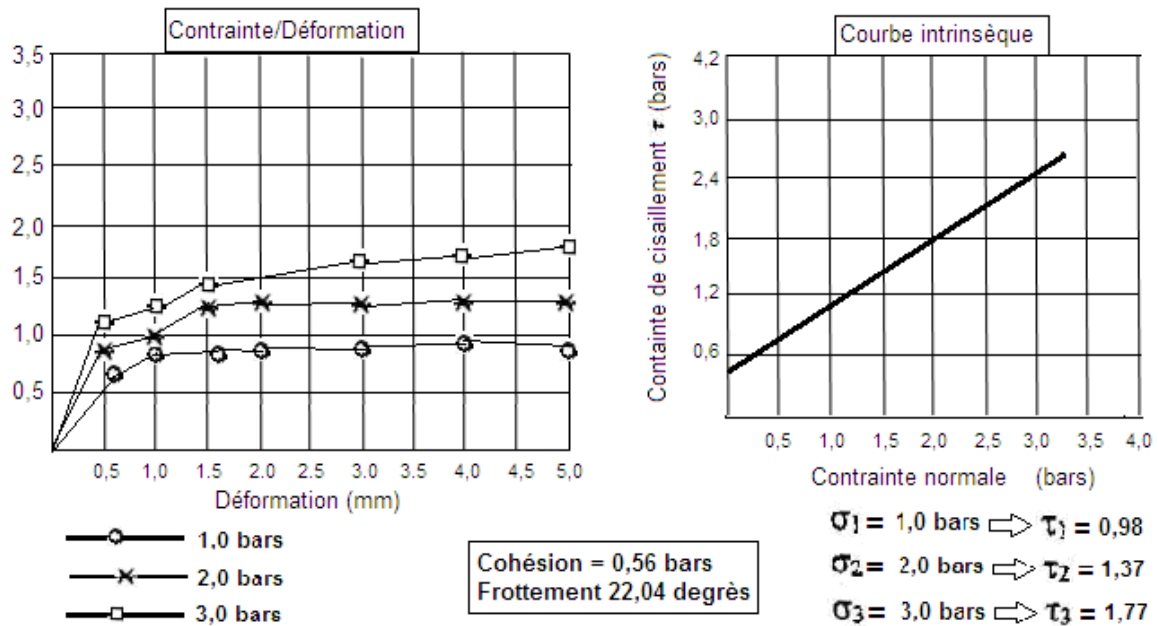


Figure 46 : Essai de cisaillement rectiligne de sol brun vertique sur marnes

Les six autres échantillons (4, 6, 7, 9, 10 et 11) ont une cohésion comprise entre 0,36 bars à 0,56 bars, de texture argilo-limoneuse à argileuse, la proportion élevée d’argile augmente des actions de contact des liaisons physiques entre les particules, ce qui leur permet ainsi la résistance du sol au cisaillement et limite l’incision.

Tableau 23 : Résultats d’analyse mécaniques des échantillons

Ech.	Limite d’Atterberg			Cisaillement		K	Classes d’érodibilité
	L.L %	L.P %	I.P %	Cu (bars)	σ_u (°)		
1	48,10	28,76	19,34	0,34	36,86	0,43	Sol très fort. érodible
2	40,10	23,57	16,53	0,30	41,66	0,20	Sol fort. érodible
3	39,00	20,72	18,28	0,35	32,82	0,41	Sol très fort. érodible
4	46,10	21,32	24,78	0,56	22,04	0,26	Sol moy. érodible
5	38,56	22,75	15,81	0,32	35,94	0,58	Sol très fort. érodible
6	30,31	20,90	09,51	0,40	25,17	0,32	Sol fort. érodible
7	46,26	26,30	19,96	0,36	32,64	0,28	Sol fort. érodible
8	45,69	24,11	21,58	0,33	40,89	0,36	Sol fort. érodible
9	46,55	27,73	18,82	0,52	31,59	0,14	Sol moy. érodible
10	50,13	27,25	22,88	0,45	41,27	0,25	Sol fort. érodible
11	47,26	28,11	19,15	0,50	21,55	0,18	Sol moy. érodible

5.1.4.3- Traitement statistique des résultats d’analyses des facteurs d’érodibilité des marnes

5.1.4.3.1- liaison entre l’érodibilité et les variables explicatives

Les variables explicatives telles que la texture, la stabilité structurale, les classes de la stabilité structurale, l’aptitude à la fissuration, la sensibilité à la battance, le risque de battance, le degré de plasticité, la perméabilité et la cohésion sont choisies comme variables explicatives.

L’érodibilité des sols est une variable supplémentaire.

5.1.4.3.2- Les valeurs propres

Elles permettent de juger numériquement l'intérêt d'un facteur, ainsi lorsqu'un facteur est associé à une valeur qui a voisine 1, il exprime une forte liaison entre les lignes et les colonnes, en revanche lorsque la valeur propre est faible, elle correspond à une liaison faible.

Le pourcentage d'inertie extrait par les trois facteurs est de **79,89 %** dont près de **50 %** pour le premier axe factoriel, ce qui explique une bonne corrélation entre les variables explicatives et l'érodibilité.

5.1.4.3.3- Inertie totale

1^{ère} colonne : valeurs propres (variance sur les axes principaux)

2^{ème} colonne : contribution à l'inertie totale (pourcentages expliqués par les axes principaux)

3^{ème} colonne : contribution cumulée à l'inertie totale (pourcentages cumulés expliqués par les axes principaux).

Tableau 24 : Pourcentage d'inertie extrait par les trois premiers facteurs (valeurs propres)

Axes factoriels	Valeurs propres %	expliqués (Inertie) %	Cumulés %
Axe 1 (F1)	5,94	49,64	49,64
Axe 2 (F2)	2,53	21,15	70,79
Axe 3 (F3)	1,09	09,10	79,89

Dans le tableau 24, les valeurs propres montrent une décroissance remarquable et irrégulière entre les trois valeurs. Les valeurs élevées correspondent aux éléments les plus importants pour la construction de l'axe factoriel, tandis que la contribution relative faible exprime la part prise par un facteur dans l'explication de la dispersion d'un élément, les fortes valeurs permettent donc de mettre en évidence les éléments qui sont les caractéristiques exclusives de l'axe factoriel.

5.1.4.3.4- Interprétation des axes factoriels

5.1.4.3.4.1- Axe factoriel F1 (figure 47-a)

Les contributions absolues indiquent l'importance de quatre variables dont l'ordre d'intervention est : la texture (T = 15,66 %), la stabilité structurale (SS = 13,44 %), l'aptitude à la fissuration (AF = 13,11 %) et la sensibilité à la battance (SB = 10,10 %).

En tenant compte des contributions relatives, nous obtenons les oppositions suivantes entre les modalités.

- Côté positif (axe factoriel F1*F2)

On trouve un groupement de la stabilité structurale (SS), les classes de stabilité structurale (CSS) et la cohésion (Cu).

- **Côté négatif** (axe factoriel F1*F2)

La texture (T), le risque de battance (RB), la sensibilité à la battance (SB) et l'aptitude à la fissuration (AF). On trouve qu'il y a une liaison entre la stabilité structurale des échantillons et la battance, quand la stabilité structurale augmente, le risque de battance diminue et vice versa. La mesure de la stabilité structurale devrait donc pouvoir permettre une évaluation rapide de la sensibilité des sols à la battance.

5.1.4.3.4.2- Axe factoriel F2 (figure 47-a)

Trois variables caractérisent cet axe avec ces quatre composantes et leurs contributions :

L'indice de plasticité (IP = 13,09 %), le risque de battance (RB = 14,55 %), la perméabilité (P = 18,21 %) et le degré de plasticité (DP = 33,12 %).

- **Côté positif** (axe factoriel F2*F1)

Nous avons trois variables le degré de plasticité (DP), l'indice de plasticité (IP) et le risque de battance (RB).

- **Côté négatif** (axe factoriel F2*F1) : On trouve sur l'axe 2, la perméabilité (P).

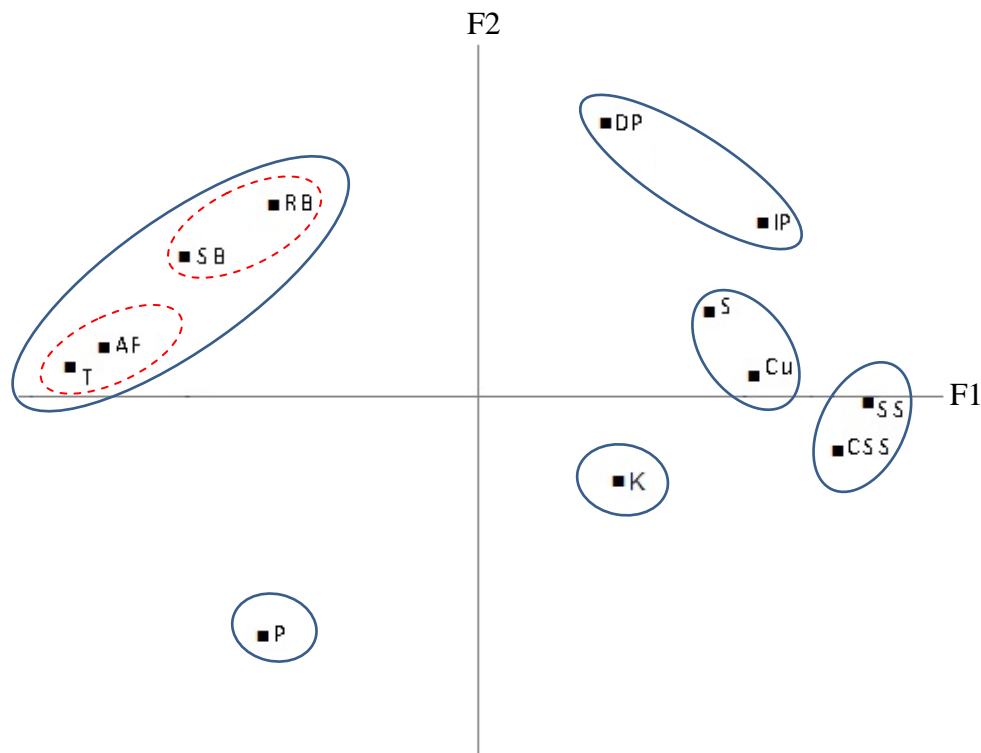


Figure 47-a : Répartition des ensembles des variables explicatives suivant l'axe 1 et 2

5.1.4.3.4.3- Axe factoriel F3 (figure 47-b)

Nous avons trois variables qui caractérisent cet axe :

La structure (S = 25,16 %), la cohésion (Cu = 23,25 %) et les classes d'érodibilité (K = 16,22 %).

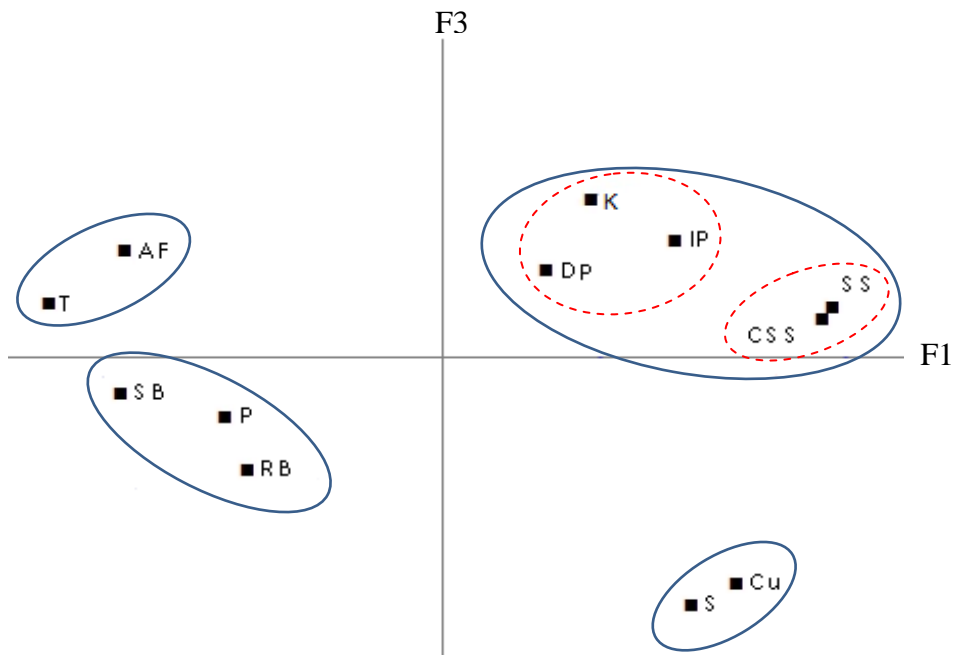


Figure 47-b : Répartition des ensembles des variables explicatives suivant l'axe 1 et 3

- **Côté positif** (Axe factoriel F1*F3) : les classes d'érodibilité
- **Côté négatif** (Axe factoriel F1*F3) : La structure (S) et la cohésion (Cu).

5.1.4.3.4.5- Interprétations des axes factoriels : Distribution des échantillons analysés.

5.1.4.3.4.5.1- Axe factoriel axe 1 (figure 48).

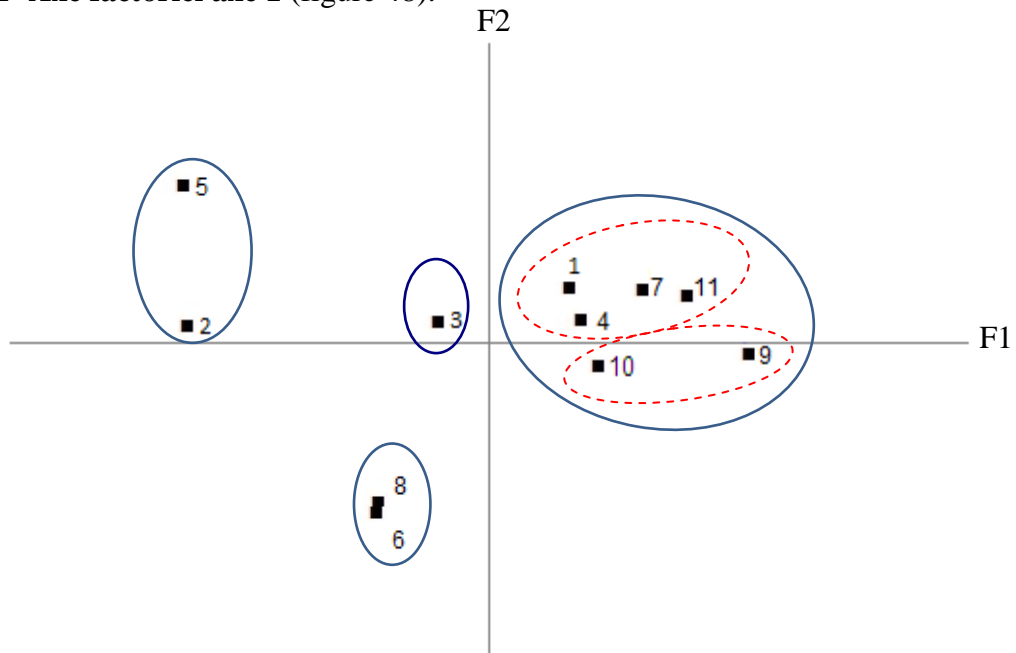


Figure 48 : Répartition des échantillons suivant l'axe 1 et 2

Les résultats de la distribution des échantillons sur le plan de projection (axe1-axe2) issu de l'AFC en relation avec la contribution des variables étudiées, nous a permis de faire les regroupements (figure 48).

- **Côté positif** (Axe factoriel F1*F2)

Ce groupe englobe six échantillons de marnes vert-clair, de sol brun vertique sur marnes, de marnes brunes, de sol calcaire-marnes, de marnes bleues compactes et calcaires et de marnes brunes armées de calcaire, ces échantillons sont caractérisés par une texture limono-argileuse, argilo-limoneuse et argileuse avec un faible risque de battance, la perméabilité est lente à modérée, le degré de plasticité varie entre moyennement plastique à plastique et la cohésion entre les particules du substrat est élevée. Ce dernier résiste mieux aux forces provoquées par le ruissellement.

La structure de ce lot d'échantillons est stable avec une aptitude à la fissuration moyenne à excellente. Parmi ces échantillons, nous signalons que les marnes bleues compactes et calcaires sont les plus résistantes à l'érodibilité, ceci est dû au taux élevé de carbonate de calcium (40,33 %) qui remonte le pH et améliore la structure, sa texture argileuse et sa structure stable et riche en cations de Ca^{++} et Mg^{++} (26,80 méq/100 g). Les argiles ont une charge électrostatique négative et les cations en solution ont une charge électrostatique positive, l'attraction entre argiles et cations permet aux argiles de former des agrégats par des ponts cationiques alors que le faible taux de sodium (0,12 %) favorise la stabilité.

La proportion des minéraux argileux constituant ce type de marnes est à dominance d'illite (entre 30 à 38 %). Les ions K^+ se trouvent très proches des points de substitution, solidement insérés entre les feuillets d'argiles, ils empêchent le gonflement de ce type d'argile. Le taux de chlorite est de 35 %. La proportion des interstratifiés (25 %) dans les marnes bleues compactes et calcaires renseigne sur un faible processus de transformation des minéraux argileux c'est pourquoi l'altération des roches reste limitée, cette proportion est élevée dans les marnes brunes armées de calcaire avec (70 %) mais la présence de calcaire (24,91 %) minimise le gonflement de ce type de marnes donc diminue l'altération et favorise la stabilité structurale.

Ce groupe présente des indicateurs qui favorisent les processus d'érosion en masse (suffosion, glissement...)

- **Côté négatif** (Axe factoriel F1*F2)

On trouve un groupe de deux échantillons tels que les marnes bleues et le sol peu évolué d'apport alluvial. Ces deux échantillons sont caractérisés par une texture limoneuse à limono-sableuse et très peu d'argiles, une faible cohésion et aucune fissuration avec une structure instable à très instable. Ils ont tendance à former une croûte de battance en surface donc ces deux échantillons ont un risque de battance élevé. La sensibilité à l'érosion des sols résulte essentiellement de la

désagrégation des mottes de terre et du détachement de particules sous l'action des pluies. Ils ont des agrégats limoneux, moins sensibles aux phénomènes de retrait-gonflement pour cela la fragmentation par fissuration reste partielle (Le Bissonais et Arrouays, 1997). Ils en résultent la formation d'une couche dense et peu poreuse qui limite l'infiltration (la perméabilité est modérée). Les échantillons sont plastiques et de faible taux de calcaire par rapport aux autres échantillons. Ces deux échantillons sont caractérisés par la prédominance de la montmorillonite avec 37 % dans les marnes bleues alors que les interstratifiés sont dominantes dans les sols peu évolués d'apport alluvial avec 45 % mais la présence de l'illite et de la Kaolinite en proportion élevée aussi, limite la dégradation des substrats par le phénomène de gonflement-retrait mais la texture limoneuse et la battance favorise le départ des sédiments par le ruissellement.

Ce groupe présente des indicateurs qui favorisent les processus d'érosion diffuse et linéaire

Les marnes grises et les marnes vert-clair armées de grès (échantillons 6 et 8) sont proches et ont les mêmes caractéristiques : (texture limono-argileuse, structure stable, aptitude à la fissuration moyenne, perméabilité modérée à lente, battance faible et plasticité moyenne), (Présence de taux élevé de sable de 24 % à 28,8 %). Elles sont classées comme des sols fortement érodibles.

Les marnes grises ont un taux de carbonate de calcium faible (9,70 %) alors qu'il est élevé (31,17 %) pour les marnes vert-clair armées de grès. Sachant que les éléments minéraux dominants dans les marnes grises sont l'illite (35 %) et la montmorillonite (30 %) alors que dans les marnes vert-clair armées de grès les interstratifiés sont dominants avec 75 %. Ces derniers représentent les produits de transformation des illites et des chlorites, considérés comme des édifices proches des smectites gonflantes favorables aux processus d'altération (Kouri et Vogt, 1996).

On peut dire que les éléments minéraux, le taux de calcaire et la texture jouent un rôle très important dans la sensibilité des marnes à l'érosion hydrique.

5.1.5- Cartographie des facteurs de l'USLE dans la partie occidentale du bassin versant de l'Oued Mina

Les résultats présentés détaillent d'une part le calcul et la spatialisation des différents facteurs de l'équation USLE (R, K, LS, C, P) et d'autre part, la spatialisation et l'estimation des pertes de sol (E) à l'échelle de la partie occidentale du bassin versant de l'Oued Mina.

5.1.5.1- Facteur R

La carte de spatialisation du facteur R (figure 49) de la partie occidentale du bassin versant de l'Oued Mina montre un étagement croissant des valeurs avec la topographie. Ainsi, l'érosivité des pluies augmente naturellement d'aval en amont et de l'Ouest vers l'Est. Les valeurs du facteur d'érosivité R varient entre 39,18 MJ.mm/ha.h.an (station pluviométrique Takmaret) et 84,81 MJ.mm/ha.h.an (station pluviométrique Mechra-Sfa) pour une tranche pluviométrique entre 269,80 mm et 496,41 mm, avec une érosivité moyenne de 61,99 MJ.mm/ha.h.an (tableau B en annexe).

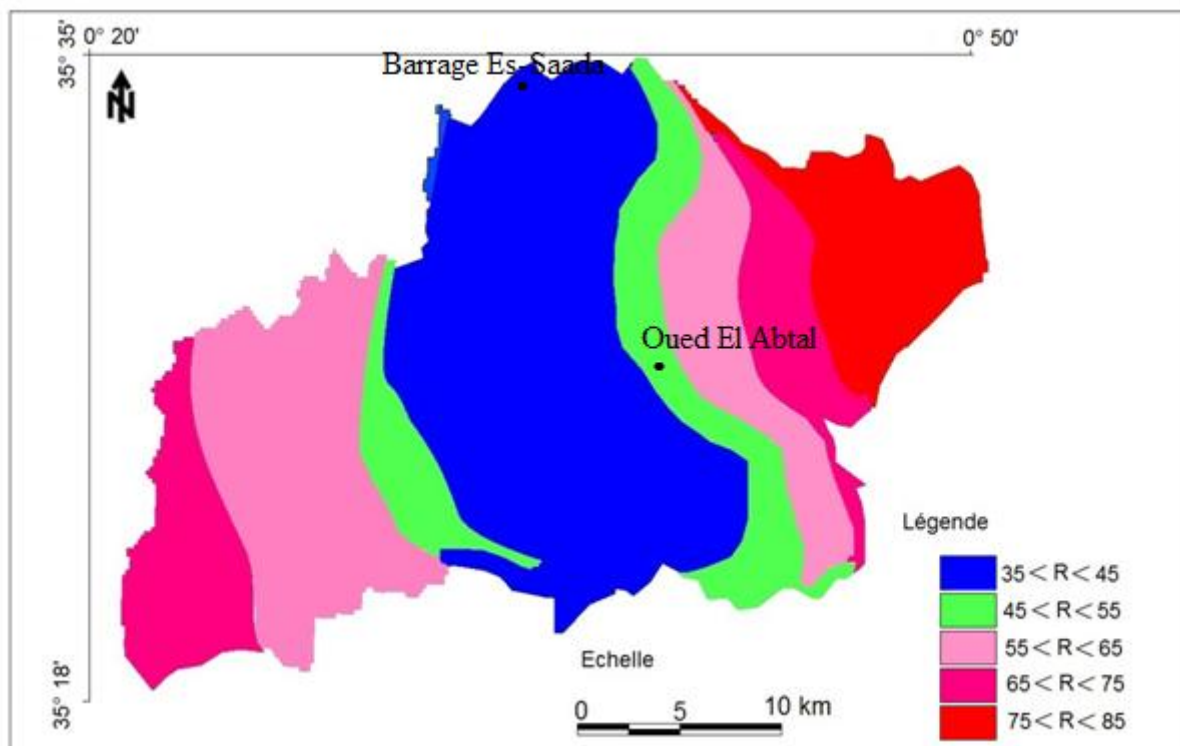


Figure 49 : Carte du facteur d'érosivité de pluies R

Cette zone est dominée par la faible classe d'érosivité de [35-45] avec une superficie de 38,31 %, alors que la classe d'érosivité élevée [75-85] est représentée par une superficie de 10,89 %.

Tableau 25 : Répartition des classes du facteur d'érosivité R dans la partie occidentale du bassin versant de l'Oued Mina.

Classes d'érosivité des pluies	Superficie (Ha)	Superficie (%)
[35-45]	28.651	38,31
[45-55]	10.496	14,04
[55-65]	17.295	23,13
[65-75]	10.194	13,63
[75-85]	08.144	10,89
Total	74.780	100

5.1.5.2- Facteur K

Les valeurs obtenues de l'indice d'érodibilité K sont comprises entre 0,14 et 0,56 répartissent en trois classes de sols (tableau 26) et fluctuant selon les différentes unités lithologiques. La surface du substrat de faible érodibilité (stable) comme les marnes bleues compactes-calcaires et les sols calcaires sur marnes sont représentées par la classe [0,10-0,20] avec une superficie de 26,75 % , ce type de substrat est dominant dans le secteur Ouest et Centre du bassin, alors que la lithologie des marnes brunes et marnes brunes armées de grès sont représentées par la classe d'érodibilité modérée [0,20-0,30], soit 37,06 %. Les marnes grises et les marnes vert-clair armées de grès sont représentées dans la classe d'érodibilité élevée [0,30-0,40] répartie sur une superficie de 8,60 %. La lithologie d'érodibilité très élevée ([0,40-0,50]) est représentée par les marnes vert-clairs avec une surface de 19,72 %.

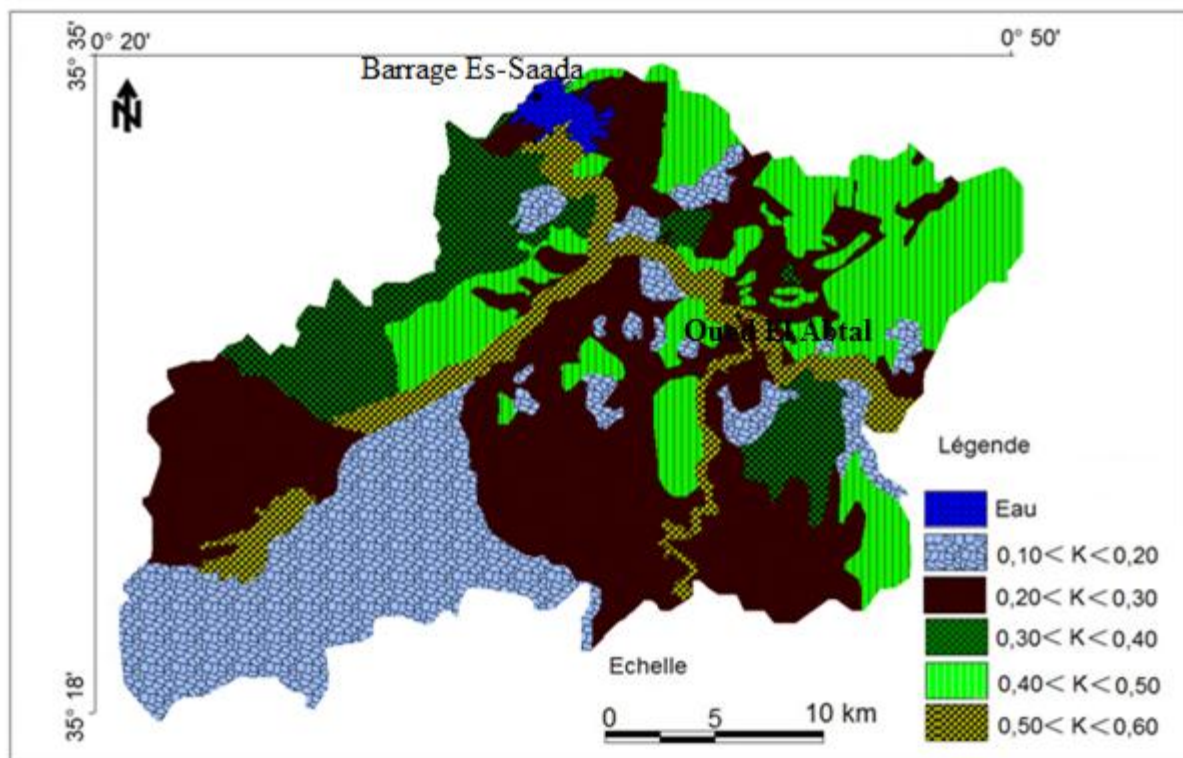


Figure 50 : Carte du facteur d'érodibilité K

Concernant les substrats très instables comme les sols d'apport alluvial, ils sont localisés proches des oueds représentés par la classe d'érodibilité très élevée [0,50-0,60] occupant une faible superficie de 7,86 % (tableau 26 et figure 50).

Tableau 26 : Répartition des classes du facteur d'érodibilité K dans la partie occidentale du bassin versant de l'Oued Mina.

Valeurs de l'indice K	Classes d'érodibilité	Superficie (Ha)	Superficie (%)
[0,10-0,20]	Faible	20.004	26,75
[0,20-0,30]	Modérée	27.717	37,06
[0,30-0,40]	Elevée	06.432	8,60
[0,40-0,50]	Très élevée	14.748	19,73
[0,50-0,60]	Très élevée	05.878	7,86
Total		74.780	100

5.1.5.3- Facteur LS

Les valeurs du facteur topographique LS montrent l'importance de l'inclinaison et la longueur de la pente dans le processus érosif, il varie entre 0,2 et 3,2. Les valeurs minimales représentent la classe [0,2-0,8] qui couvre 42,38 % et se présente généralement dans la plaine alluviale dans le côté Ouest et dans les lits des Oueds de la partie occidentale du bassin versant. Les valeurs de la classe [0,8-1,4] sont modérées, soit 24,99 %.

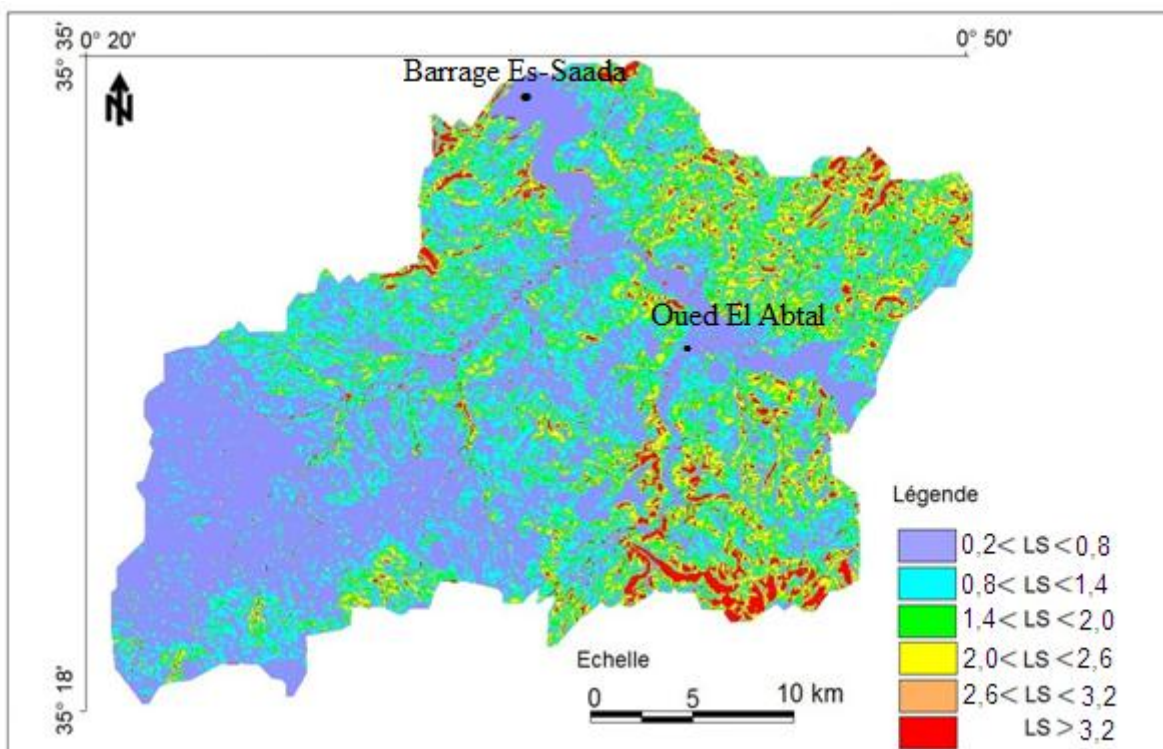


Figure 51 : Carte du facteur topographique LS

Les valeurs des classes [2,6-3,2] et [$>3,2$] varient successivement de 4,91 % et 0,55 % sont réparties sur des terrains escarpés et des zones de hautes altitudes (tableau 27).

Selon la figure 51 on remarque un contraste entre les différents modelés de la partie occidentale du bassin versant, les pentes faibles sont peu sensibles au processus d'érosion tandis que les reliefs accidentés en amont révèlent une sensibilité plus importante aux processus érosifs.

Tableau 27 : Répartition des classes du facteur LS dans la partie occidentale du bassin versant de l'Oued Mina

Classes de facteur LS	Superficie (Ha)	Superficie (%)
[0,2-0,8]	31.692	42,38
[0,8-1,4]	18.688	24,99
[1,4-2,0]	10.813	14,46
[2,0-2,6]	09.505	12,71
[2,6-3,2]	03.671	4,91
[>3,2]	0411	0,55
Total	74.780	100

5.1.5.4- Facteur C

L'occupation des sols est en rapport avec les activités humaines et avec d'autres facteurs comme la lithologie, le relief et le climat. L'analyse de l'interprétation de l'image satellite a permis d'identifier les principaux types d'occupation du sol dans notre zone test (forêt, matorral, reboisement, arboriculture, cultures maraichères, céréaliculture et terrains nus). Elle a montré que le couvert végétal est très dispersé et dominé par l'activité agricole comme la céréaliculture et la plantation des arbres fruitiers et les cultures maraichères (figure 52). La formation forestière est concentrée dans la zone de forte pente à l'est (*Tetraclinis articulata*, *Quercus ilex*, *Olea europaea*, *Pistacia* sp., *Rhamnus* sp. et *Cistus* sp.), alors que la zone du matorral sous forme de formation d'arbustes discontinue occupant une superficie importante dans la partie centre et Ouest formée par *Tetraclinis articulata*, *Juniperus oxycedrus*, *Pinus halepensis*, *Stipa tenacissima*, *Artemisia herba-alba*, *Ampelodesma mauritanicum*... etc.

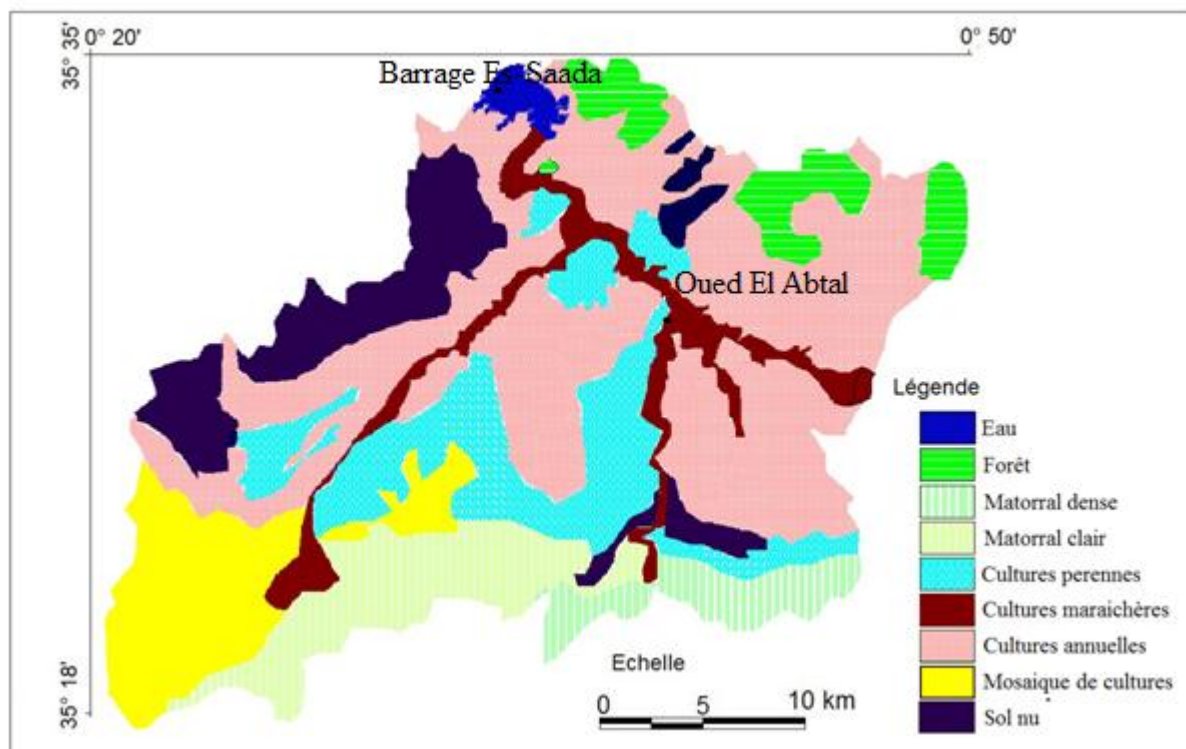


Figure 52 : Carte d'occupation du sol

Tableau 28 : Valeurs de C correspondant aux différents types d'occupation du sol dans la partie occidentale du bassin versant de l'Oued Mina

Classes d'occupation du sol	Valeur de C attribuée	Superficie (Ha)	Superficie (%)
Forêt	0,33	4.080	5,46
Matorral dense	0,56	3.243	4,34
Matorral clair	0,68	6.367	8,51
Cultures pérennes	0,70	10.537	14,09
Cultures maraichères	0,50	5.292	7,08
Cultures annuelles	0,64	28.602	38,25
Mosaïque de cultures	0,51	8.538	11,42
Terrain nu	1	8.121	10,85
Total		74.780	100

La végétation dense comme la formation forestière est associée au coefficient faible (0,33), et le coefficient le plus élevé correspond au terrain nu (proche de 1).

5.1.5.5- Facteur P

Les pratiques antiérosives utilisées dans la partie occidentale du bassin versant de l'Oued Mina sont le reboisement en banquettes (photo 2), les travaux de terrassement, le labour en courbe de niveau, la culture en courbe de niveau, les bandes alternées (photo 3), le billonnage, le buttage et les terrains nus. La pratique agricole est d'une grande influence sur l'érosion hydrique (tableau 29 et figure 53).



Photo 2 : Reboisement en banquettes



Photo 3 : Travaux en bandes alternées

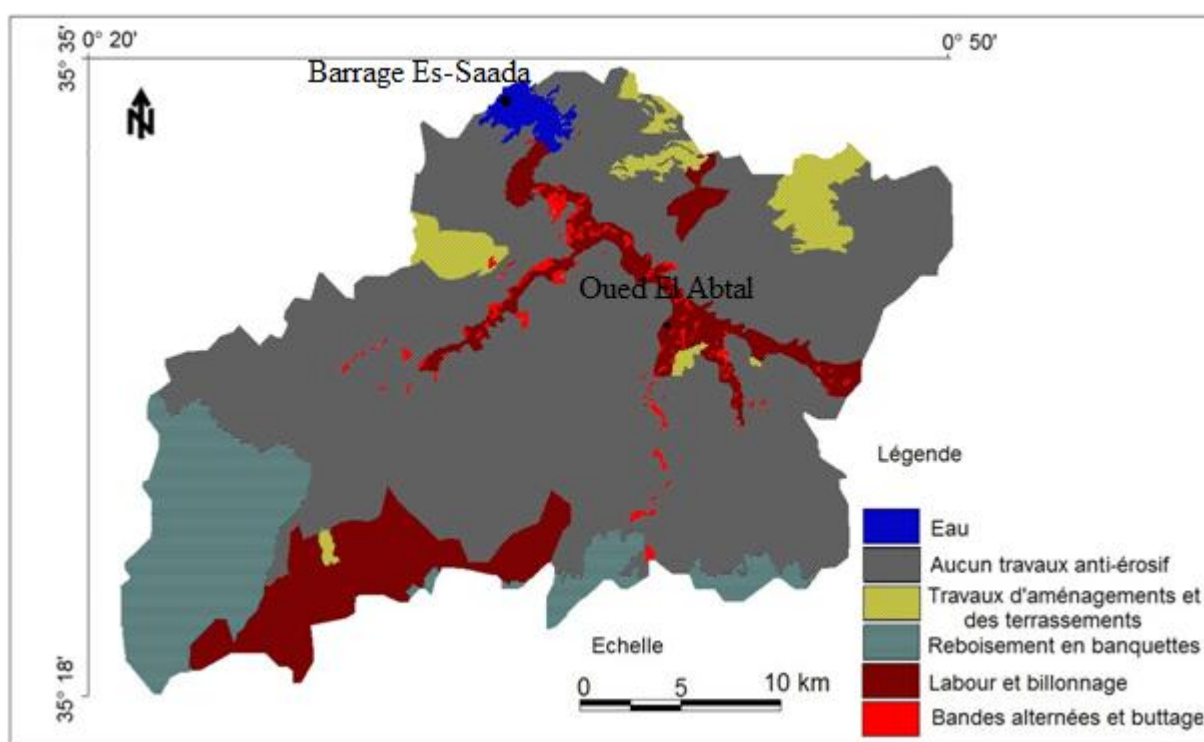


Figure 53 : Carte des pratiques antiérosives

Tableau 29 : Valeurs de P correspondant aux différents types des travaux de lutte contre l'érosion dans la partie occidentale du bassin versant de l'Oued Mina

Classe des travaux antiérosifs	Valeur de P attribuée	Superficie (Ha)	Superficie (%)
Aucun travail antiérosif	1	51.605	69,01
Travaux d'aménagement et des terrassements	0,20	3.565	4,77
Reboisement en banquettes	0,25	9.586	12,82
Labour et billonnage	0,50	8.965	11,99
Bandes alternées et buttage	0,37	1.059	1,41
Total		74.780	100

5.1.5.6- Taux annuel de pertes en sol (E exprimé en t/ha/an)

Les cinq facteurs cités auparavant jouent un rôle dans le processus érosif. L'utilisation d'un SIG et de l'équation universelle des pertes en sol a permis d'intégrer les différents facteurs pour estimer les pertes en sol et de délimiter les zones prédisposées à une dynamique érosive intense. La superposition des cinq couches thématiques représentant les facteurs de l'érosion sous format Raster, a permis l'obtention de la carte des pertes en sol dans notre zone test, exprimant la valeur d'érosion en t/ha/an par unité spatiale (figure 54).

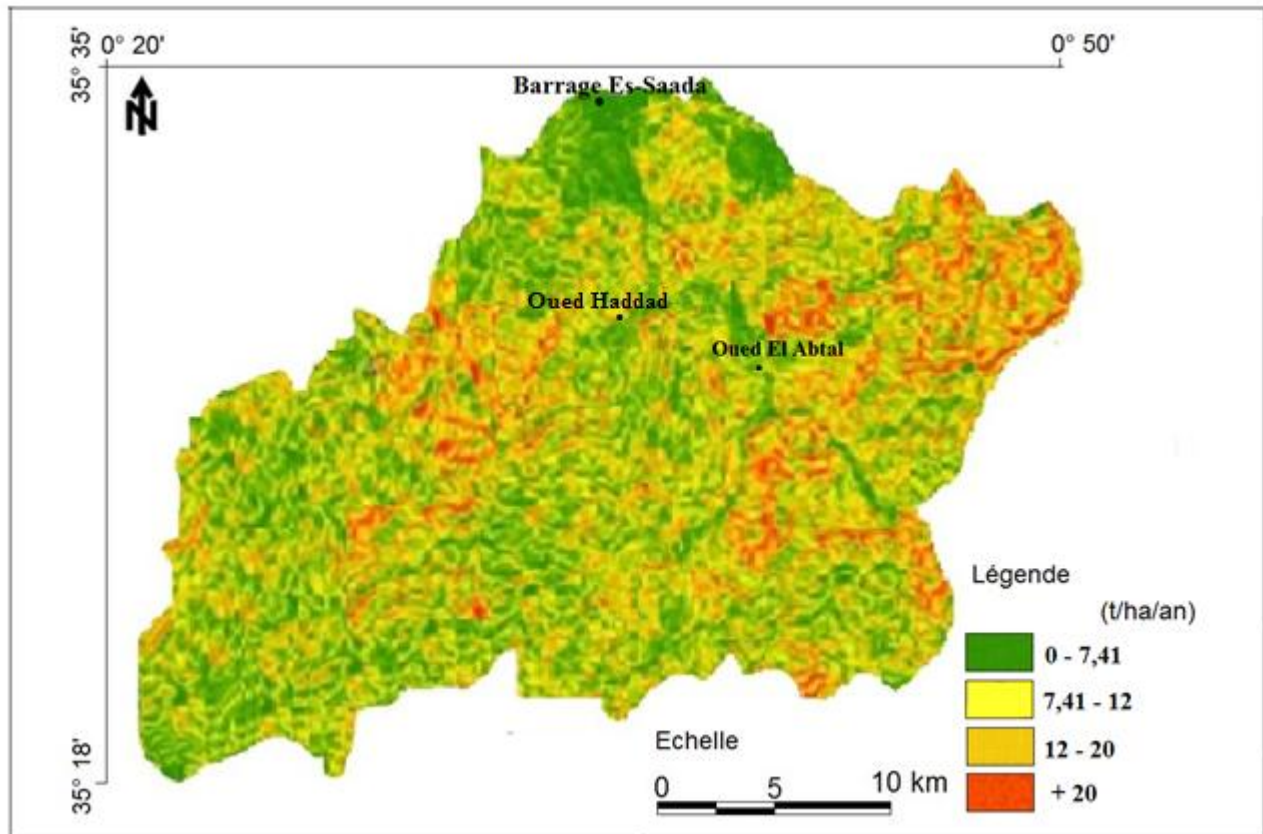


Figure 54 : Carte des pertes en sol (E)

La carte synthétique de la perte en sol montre que le taux de l'érosion diffère d'une zone à l'autre en fonction de l'influence de chaque facteur qui contrôle l'érosion hydrique, variant entre 0 et plus de 20 t/ha/an répartis sur l'ensemble de la partie occidentale du bassin versant de l'Oued Mina. Les différentes unités de la carte ont été regroupées en 5 classes de perte en sol pour une meilleure visualisation spatiale et lisibilité.

On a déterminé les limites de classe des pertes en sol utilisées au Maroc par Sadiki et *al.* (2004) et en Algérie par Benchettouh et *al.* (2017) : érosion faible [0-7,41 t/ha/an], modérée [7,41-12 t/ha/an], élevée [12-20 t/ha/an], très élevée ou dangereuse [> 20 t/ha/an].

Les résultats présentés dans le tableau 30 montrent qu'environ 45,5 % de la superficie de la zone test présente un risque faible d'érosion (< 7,41 t/ha/an). Cette classe occupe les parties Centre et Ouest du bassin versant. La lithologie est relativement stable et couverte par des formations forestières. La classe [7,41 et 12 t/ha/an] occupe une superficie de 17,23 %, avec des sols de formation superficielle issus de terrains essentiellement marneux manifestent une grande susceptibilité au ruissellement.

La classe [12-20 t/ha/an] correspondant aux fortes pertes en sol, occupe une surface de 21,26 %, sur des terrains dénudés avec un type de marne très érodible favorisé par des facteurs d'ordre naturels et aussi anthropiques. Environ 16,01 % de la superficie a subi de pertes en sol très élevée (> 20 t/ha/an), ce qui montre une grande fragilité de la partie occidentale du bassin versant de l'Oued Mina. Au total, 45,50 % de superficie de la partie occidentale du bassin versant de l'Oued Mina présente des taux d'érosion inférieurs ou égale au seuil de tolérance (7,41 t/ha/an), alors qu'environ 54,5 % de la superficie de cette zone présente un risque érosif supérieur à 7,41 t/ha/an. A cet effet, cette dernière nécessitera des mesures d'intervention.

Le taux moyen de perte de sol estimé à 11,38 t/ha/an se situe dans les catégories à risque érosif modéré. A cet effet, le facteur topographique apparait clairement dans la zone test où coïncide une pente moyenne à forte sur des terrains nus ou agricoles. Au niveau de ces deux types d'occupation du sol, les taux d'érosion augmentent sensiblement avec la pente. Roose (1994) a montré que l'augmentation de la pente de 0,25 % peut engendrer une augmentation de 11 % du taux de ruissellement moyen annuel et une augmentation des pertes en sol de 3,6 t/ha/an. Pourtant, la pente n'est pas le seul facteur responsable, la lithologie de type marneux constitue un facteur intensifiant du phénomène d'érosion dans cette zone.

Néanmoins, il est à signaler que ces pertes sont inégalement réparties sur le plan spatial, cela signifie que les zones fortement touchées par le risque érosif correspondent surtout aux zones Est et Sud-Ouest du bassin versant où s'étendent des marnes vert-clair et des sols peu évolués faiblement protégés. Les faibles valeurs de perte en sol correspondent aux zones de faible pente.

Tableau 30 : Classes des pertes en sol (t/ha/an) dans la partie occidentale du bassin versant de l'Oued Mina.

Taux des pertes en sol (t/ha/an)	Classes d'érosion des sols	Superficie (Ha)	Superficie (%)
0 – 7,41	faible	34.024,9	45,5
7,41 - 12	Modéré	12.884, 59	17,23
12 - 20	Elevé	15.898,23	21,26
E > 20	Très élevé (dangereux)	11.972,28	16,01
Total		74.780	100

La zone marneuse du bassin versant de l'Oued Mina est menacée par l'intensité du risque d'érosion hydrique dans le temps et dans l'espace. Touaibia et Achite (2003), ont observé les plus grandes valeurs de l'érosion dans la zone Nord du bassin versant de l'Oued Mina et plus précisément dans la zone dite des marnes avec une érosion importante dépassant 20 t/ha/an dans les secteurs marneux dépourvus de végétation. Dans le bassin versant d'Oued Mina, Benchettouh et *al.*(2017) ont estimé le taux de perte en sol à 11,20 t/ha/an.

Au Maroc, Laouina (1992) a observé que lorsque le sol est labouré pour une culture sarclée, l'érosion peut dépasser 20 t/ha/an sur des pentes de 20 % alors que lorsque le sol est couvert d'un matorral dense, d'herbes rases, de cistes ou de rocailles, l'érosion ne dépasse pas 0,2 à 2 t/ha/an.

Au bassin versant de l'Oued Tlala et de l'Oued Boussouad (Maroc), la tolérance de perte de terre est estimée à 7,41 t/ha/an ce qui permet un niveau élevé de production agricole. Au-delà de 20 t/ha/an, la perte est forte et les sols sont très dégradés ce qui peut nuire à la production (Sadiki et *al.*, 2004). En Tunisie, la perte moyenne de sol ne peut pas dépasser 10 t/ha/an selon Masson (1971) alors que Jebari et *al.* (2012), estiment le seuil de tolérance de perte de sol à 8 t/ha/an au bassin versant de l'Oued Jannet. Selon Wischmeier et Smith (1978), le sol peut supporter une perte allant jusqu'à 12 t/ha/an.

Les travaux de Kouri et *al.* (1997) ont montré que cette zone est très sensible au phénomène de ravinement, 57 % sont des terrains sensibles aux processus d'érosion linéaire. Ainsi, l'érosion en ravines et les glissements de terrain sont les types d'érosion les plus actifs sur les terrains marneux.

Les projets d'aménagement envisageables doivent tenir compte de l'ampleur de l'érosion et des quantités de sédiments produites annuellement dans cette partie du bassin versant de l'Oued Mina.

Conclusion

L'objectif est de décrire la mise en œuvre d'un modèle spatialisé et quantitatif de l'érosion hydrique potentielle sur la partie occidentale du bassin versant de l'Oued Mina. Il vise à explorer les données exploitables et à apporter une estimation sur la quantité de sédiments fournie par le bassin versant et susceptible de contribuer à l'envasement du Barrage Sidi M'hamed Ben Aouda.

L'évaluation des pertes en sol a permis de mettre en évidence une classification des surfaces de la partie occidentale du bassin versant de l'Oued Mina, en fonction de l'importance du risque de l'érosion hydrique des zones les plus sensibles.

Notre zone test occupe environ une superficie de 74.780 ha. Elle subit une perte moyenne de 11,38 t/ha/an. Bien que 54,5 % de superficie est sous le risque d'érosion supérieur au seuil de tolérance (7,41 t/ha/an). L'approche utilisée a montré que les zones présentant un risque érosif important qui se localisent principalement en amont du barrage de Sidi M'hamed Ben Aouda.

Cette zone test est dominée par une formation lithologique marneuse. Le modèle utilisé permet d'estimer l'érosion en nappe et ne permet pas de calculer les autres types d'érosion comme celle du ravinement.

L'érosion par ravinement est très intense par rapport à l'érosion en nappe (Kouri, 1993 ; Gomer, 1994 ; Touaibia et *al.*, 1999). Une lutte contre le ravinement est nécessaire ; elle permet de guider les gestionnaires vers des techniques adaptées au contexte local.

Le choix d'une stratégie de lutte contre l'érosion hydrique se basera sur le diagnostic en vue de proposer des techniques efficaces et peu coûteuses.

5.1.6- Elaboration d'un modèle de lutte contre le ravinement

La lithologie de la partie occidentale du bassin versant présente des formations dominantes constituées essentiellement de marnes très peu résistantes à l'érosion hydrique en alternance par endroits, avec des bancs de calcaires et de grès.

La plupart des auteurs ayant mené des travaux de recherche dans la zone s'accordent sur l'importance des processus de ravinement dans les transports solides (Gomer, 1994 ; Touaibia, 2000 ; Achite et Meddi (2005) ; Meddi, 2015), c'est pourquoi nous avons proposé un modèle de lutte contre le ravinement, par des méthodes techniques et économiques pour réduire le transport des sédiments et par conséquent, l'envasement du barrage de Sidi M'hamed Benaouda.

5.1.6.1- Evaluation des seuils mis en place dans la stabilisation du ravinement

5.1.6.1.1- Seuils en gabion (photo 4)

Malgré son coût qui est excessivement élevé (28.500 DA), le seuil en gabion demeure un ouvrage très solide et efficace sur le terrain. Cependant, il demande une très grande attention lors de sa réalisation dans la mesure où le sens de la roche doit avoir une grandeur au moins égal à 1,5 fois la grandeur des mailles.



Seuil en gabion



Seuil en pierre sèche



Seuil en sacs plastiques



Seuil en pneus usagés



Seuil en traverses de bois

Photo 4 : Différents types de seuils utilisés pour la fixation mécanique de la ravine

Les seuils en gabion présentent une meilleure stabilité et une bonne assise. Sa mise en place sur la ravine nécessite environ 02 journées avec 03 ouvriers.

5.1.6.1.2- Seuils en pierres sèches

Le seuil en pierre sèche reste une structure qui a déjà fait ses preuves sur le terrain et demeure toujours un ouvrage à considérer. Cependant, c'est un ouvrage qui est très lourd et qui mobilise beaucoup plus de temps pour sa réalisation (environ 01 journée avec 02 ouvriers). Il serait très adapté aux endroits où la pierre est très disponible et où l'accès y est facile mais sur le plan de l'efficacité, ce type de seuils est moins stable sur les terrains marneux.

Tableau 31 : Efficacité de trois types de seuils sur le ravinement (Roose et *al.*, 2000)

Type de seuil	En gabion	En pierres sèches	En grillage
Capture des sédiments	très rapide	rapide	rapide
Durabilité	fragile	fragile	plus durable
Coût	500 FF/m ³	400 FF/m ³ (soit 75 %)	125 FF/m ³ (soit 25%)

Selon Roose et *al.*, 2000, les seuils en grillage métallique (microbarrages perméables) se sont révélés très bien adaptés aux conditions des ravines moyennes sur marnes et schistes tendres. Ces seuils sont à la fois très souples face aux pressions des ravines en crue, faciles à transporter et à monter, efficaces même pour piéger les altérites de roches argileuses, les dispositifs les plus résistants durant les crues des averses de fréquence rare. Leur pose est rapide en milieu d'altérites tendres et leur coût ne dépasse pas le quart du celui des gabions. Malheureusement, avant le recouvrement par les sédiments, ils ne sont pas à l'abri du vol par les riverains.

5.1.6.1.3- Seuils en sacs plastiques

La préparation et l'assemblage de 20 sacs en plastique ont été réalisés difficilement par rapport aux seuils en bois et pneus usagés. La difficulté rencontrée lors de son installation est liée à l'effort de remplissage des sacs avec de la terre végétale et le poids des sacs engendré lors de leur superposition les uns sur les autres ce qui rallonge la durée de réalisation de l'ouvrage. Il est à remarquer que cet ouvrage a subi quelques modifications suite à l'insolation causée par les rayons ultra-violets. Les sacs peuvent résister jusqu'à 03 ans, entre temps la terre végétale à l'intérieur des sacs a tendance à se sédimer, puisque l'ouvrage demeure toujours intact. Cependant, il faut compléter d'urgence la végétalisation des atterrissements (en plus de la végétation spontanée) pour assurer la pérennité de l'ouvrage. Ces seuils sont caractérisés par une bonne stabilité et une meilleure efficacité vis-à-vis de l'arrêt de sédiments ce qui favorise l'installation des espèces pionnières. Ces seuils résistent bien dans les zones marneuses.

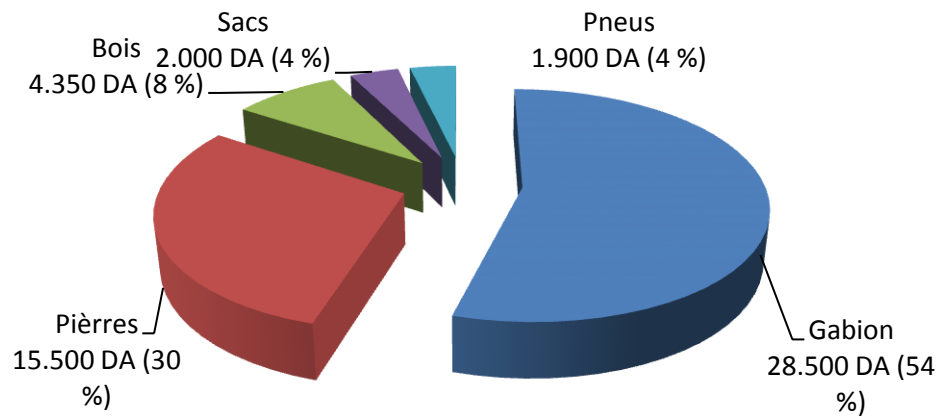


Figure 55 : Coût de réalisation des différents types de seuil

5.1.6.1.4- Seuils en traverses de bois

Il est à noter pour ce type de structure, que l’absence de la maille extrudée en plastique réduit énormément l’efficacité du seuil (passage des sédiments fins à travers les billes en bois). Cependant, nous avons remarqué lors de l’exécution du projet, la rapidité et la facilité que peut offrir cette technique. Le coût de cet ouvrage demeure largement inférieur à la structure en pierres sèches (figure 55).

5.1.6.2- Démarches préconisées pour la fixation biologique

Les haies antiérosives sont implantées en ligne et interligne suivant les courbes de niveau et bandes enherbées pour assurer une efficacité rapide après la mise en place. La distance entre les lignes est en fonction de la pente et est fixée par un intervalle vertical (dénivelée entre deux haies successives) de 02 m sur les versants et les lèvres des ravines, et de 01 m sur les atterrissements (Photo 5). L’ouverture des potêts à un volume de (40 x 40 x 40 cm³) ensuite sera effectué la mise en place des plants avec leurs mottes après d’enlèvement de leur conteneur.



Photo 5 : Ouverture des potets de plantation pour la fixation biologique du versant

Le tout est complété avec de la terre fine, afin d'assurer un bon contact entre le sol et les racines et un bon tassement. L'arrosage des plants sera effectué lors de la mise en terre des plants et durant la saison sèche suivant les trois premières années du reboisement. Les plants choisis ayant une vitesse de croissance rapide de la partie aérienne et racinaire très ramifiés et de chevelu bien développé qui protège le sol contre l'effet de ruissellement.

Les espèces utilisées pour la fixation du versant et de la ravine jouent un double rôle de fixation du lit et des parois de la ravine, elles sont aussi utilisées comme fourrage. Ces espèces plantées selon un dispositif de bandes enherbées et de cordons empierrés disposées le long du versant, selon les courbes de niveaux et perpendiculairement à la pente du terrain (figure 56).

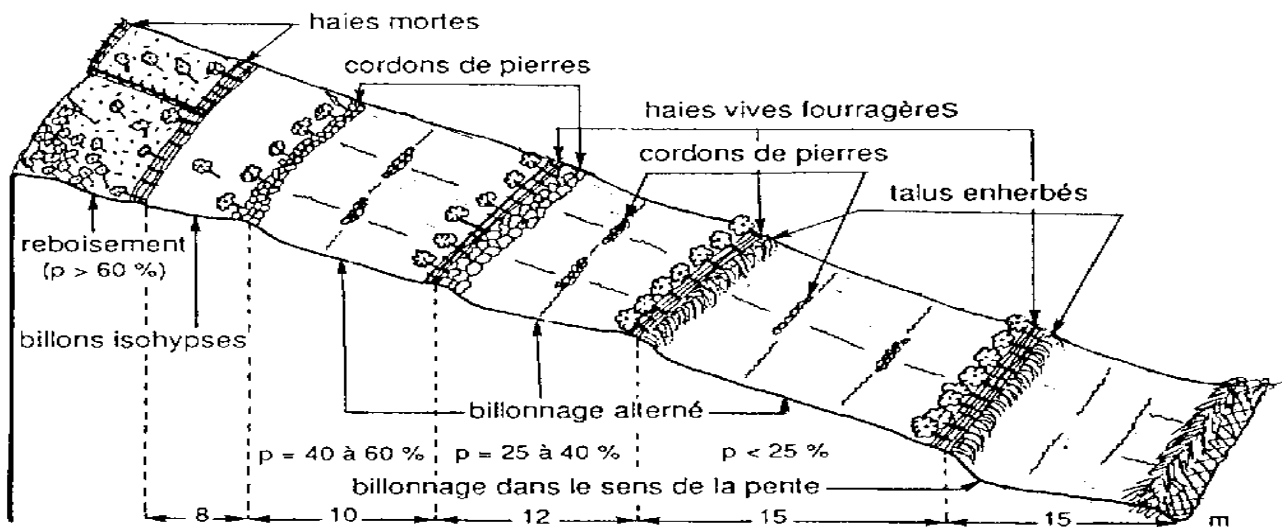


Figure 56 : La disposition des billons sur les versants en fonction de la pente (Roose, 1994)

Ceci a permis alors une lente récupération des sédiments et favorisant ainsi l'infiltration, mais également le piégeage des éléments fins transportés par le ruissellement. Ce dispositif a évolué progressivement en terrasses et ne nécessite aucun entretien. Ces bandes progressives avec talus enherbés seront constituées essentiellement d'arbustes comme : *Ampelodesma mauritanicum*, *Agave americana*, *Opuntia ficus-indica*, *Pistacia vera*, *Chaemerops humilis*, *Nerium oleander*, *Pistacia lentiscus*, *Medicago sativa*, *Medicago arborea*, *Atriplex halimus*, *Atriplex canescens*, *Acacia cyanophylla*, *Robinia pseudo-acacia*, *Ceratonia siliqua*, *Gleditshia Triacanthos* et *Fraxinus dimorpha* ...etc (Photos 6 et 7).

La végétation des interlignes diminuerait les risques de glissement de terrain par la répartition des eaux d'infiltration sur une plus grande surface. Les arbres fourragers plantés sont complétés à la couverture herbeuse du sol, toutefois les espèces introduites ne peuvent pas gêner d'autres espèces herbeuses du sol.



Photo 6 : Fixation biologique en amont à base d'*Opuntia ficus-indica*, d'*Agave americana* et *Ampelodesma mauritanicum*



Photo 7 : Plantation d'*Opuntia ficus-indica* et *Pinus halepensis* selon les courbes de niveau sur versant

5.1.6.3- Efficacité des seuils utilisés pour la stabilisation de la ravine

La mise en place de seuils légers dissipateurs d'énergie constitue en fin de compte une excellente solution pour réduire la vitesse d'écoulement et de contrôler la capacité d'arrachement des matériaux. Les travaux effectués sur le lit de la ravine nous ont permis de collecter une quantité assez importante de sédiments (environ 2 à 3 m³ pour deux années (02) d'expérimentation) par les atterrissements qui se sont formés sur la paroi amont du seuil.

Les différents relevés topographiques des profils en long effectués dans le cadre du suivi avant et après aménagement nous ont permis de dégager les observations suivantes:

Relèvement du profil en long de la ravine après chaque saison pluvieuse en comparaison avec le profil initial avant aménagement. Ceci a induit une diminution de la pente naturelle du lit par conséquent, une réduction de la vitesse de ruissellement des eaux pluviales ; d'où une stabilisation du profil de la ravine.

Nous avons été surpris par la vitesse avec laquelle les atterrissements ont renforcé les seuils et modifié la pente d'équilibre du lit de la ravine au point qu'au bout de 02 ans l'enfouissement des matières organiques dans l'ensemble de l'horizon superficiel aboutissent à une amélioration de 1 % du taux de matière organique (photo 8). Cette stabilisation a engendré la réinstallation d'une végétation spontanée tels que *Ampelodesma mauritanicum*, *Lotus glareolus*, *Lavandula dentata* et *Cistus monspeliensis* qui à son tour a permis aux particules de limon, d'argile et de sable de s'amonceler.



Photo 8 : Renforcement des seuils par de l'Eucalyptus



Photo 9 : Installation de la végétation spontanée dans les atterrissements

Cet équilibre du profil en long a également permis un ralentissement de l'écoulement de l'eau protégeant ainsi le fond et les berges contre tout affouillement et régression de la tête de la ravine.

L'élargissement du profil en travers de la ravine a permis de réduire considérablement la hauteur de la lame d'eau. Celle-ci variait au départ avant aménagement de 10 à 20 cm et dont la largeur du profil en travers était de l'ordre de 30 à 50 cm pour passer après aménagement jusqu'à une hauteur de lame d'eau de l'ordre de 02 à 05 cm et une largeur du profil en travers atteignant les 02 m.

Ces observations effectuées sur le terrain, nous ont permis de constater cette comparaison et d'apprécier l'efficacité d'une part du dispositif antiérosif mis en place et de l'autre, le rôle encore une fois des atterrissements qui ont favorisé l'étalement des eaux à la surface du lit de la ravine. Ce qui favorise d'avantage de frottement et une vitesse d'écoulement plus faible, permettant de dissiper l'énergie des eaux de pluie et de réduire leur capacité de transport (photo 9).

5.1.6.4- Impact de la réduction du ruissellement sur la stabilité des ravines

Les résultats obtenus ont permis de déduire qu'il était possible de faire appel à des structures légères dissipatrices d'énergie pour lutter contre le ravinement dans les zones marneuses et sur des pentes douces n'excédant pas les 30 %; et ce, à des coûts très abordables et avec une rapidité d'exécution convenable et assez intéressante.

La mise en place de ces techniques au niveau de la zone marneuse plus précisément sur une ravine s'est avérée très efficace dans la mesure où les sédiments ont été stoppés, le ravinement par conséquent est réduit considérablement. Le profil d'équilibre étant atteint suite aux atterrissements accumulés derrière les ouvrages implantés le long de la ravine, ce qui a permis un élargissement du profil en travers du lit et la réinstallation d'une végétation spontanée, il s'en suit une réduction de l'intensité de l'écoulement et son pouvoir érosif. Le choix des techniques culturales permet de gérer au mieux la biomasse disponible (en particulier les résidus de culture), la rugosité du sol et la

concentration en surface des éléments les plus résistants à l'érosivité des gouttes de pluies et au ruissellement (mottes moyennes, matières organiques et mulch de cailloux ou de résidus de culture). Sauf exception, c'est à la surface du sol que se joue la résistance à l'érosion pluviale, c'est donc à la surface du sol qu'il faut concentrer les moyens de lutte.

L'étude comparative des coûts de réalisation de différents types d'ouvrages a montré que la confection de trois seuils légers (bois, sacs et pneus) est inférieure à un seuil en gabion en pierres sèches en matière de coût. Il s'est avéré que la rapidité dans l'exécution de cette technique est également un paramètre positif à prendre en considération, ce qui nous pousse à encourager davantage ce type d'aménagement dans les bassins versants.

Il ressort également de cette étude que les structures légères tel que les sacs en plastique, les traverses en bois et les pneus usagés par le biais des atterrissements cumulés derrière les seuils lors des averses et des crues ; pouvaient avoir une incidence directe sur la diminution du profil en long. L'élargissement du profil en travers du lit de la ravine et la réinstallation d'une végétation spontanée ; par conséquent une influence sur la réduction de l'intensité de l'écoulement et son pouvoir érosif.

L'opportunité étant offerte grâce à ce travail de mettre en exergue les différentes stratégies et méthodologies d'approche nécessaires à la mise en place des différents protocoles d'essais, au suivi et à la pondération des résultats.

5.1.6.5- Conditions et mesures de précaution pour garantir l'efficacité de l'aménagement

La dégradation actuelle des terres des bassins versants dans le Tell oranais n'est pas un phénomène nouveau. La fragilité des sols occasionnée par la dégradation de la couverture végétale constitue la principale cause de diminution de la fertilité des sols et de la perte de surface cultivable qui aboutit à une dégradation rapide des propriétés physico-chimiques des horizons superficiels.

Sur les versants, ce phénomène débute par une érosion en nappe et évolue rapidement, surtout sur les pentes relativement fortes, pour former des rigoles puis des ravines importantes. Les mesures de l'érosion effectuée par Kouri et *al.* (1997) dans le bassin versant de l'Oued Mina sur des parcelles expérimentales montrent que les apports en sédiments des interfluves sont faibles alors que le ravinement est la source principale des sédiments. Selon les mêmes auteurs, les efforts d'aménagement doivent être portés en priorité dans la partie du bassin où le phénomène de ravinement est intense.

Des mesures de précaution adéquates ont été prises lors de la réalisation et à la fin du projet afin de garantir une efficacité et pérennité du dispositif dans un milieu argileux. Il s'agit de bien ancrer solidement les ailes des ouvrages afin d'éviter les infiltrations latérales. Les seuils en gabion présentent une bonne assise et fixent plus vite les sédiments, mais peuvent être détruits par la

formation de renard (tunnel creusé par l'énergie des eaux de ruissellement). Le coût de réalisation des types des seuils est très élevé, car il exige une certaine technicité (Roose et *al.*, 2000).

Les seuils en traverses de bois, de pneus usagés et de sacs en plastique ont prouvé leur efficacité et leur résistance. La fixation biologique en complément de ces ouvrages permettra de leur assurer une pérennité.

Certaines structures telles que les seuils en traverses de bois et les pneus usagés nécessitent un renforcement et une fixation de leurs supports afin de les consolider davantage et de garantir leurs efficacité dans la lutte contre le ravinement. La stabilité et la résistance du seuil sont liées à une bonne fondation et un bon ancrage dans les berges des seuils (entre 50 et 100 cm), les ancrages diminuent le danger d'affouillement autour des seuils. L'entretien des ouvrages augmente leur durée de vie. Le matériel végétal utilisé pour la fixation biologique des versants doit répondre aux conditions suivantes :

- Les exigences écologiques des plants doivent être identiques aux conditions écologiques de la région ;
- La vitesse de croissance rapide de la partie aérienne (taux de recouvrement élevé) et la partie racinaire (système racinaire très développé et ramifié) ;
- Le système racinaire de chevelu bien développé qui protège le sol contre l'effet de ruissellement et en parallèle améliore la cohésion des sols afin de renforcer leurs propriétés mécaniques ;
- Les plants doivent être très résistants à la sécheresse et aux maladies ;
- Ne limite pas la croissance d'autres espèces plus petites qui assurent la couverture permanente et continue du sol ;
- La caractérisation par un intérêt économique (valeur fourragère élevé) et doivent constituer une nourriture pour le bétail en période de disette (espèces fruitières, fourragères et productrices de bois) ;

L'inspection systématique, la réparation et l'entretien des seuils constituent une mesure importante de gestion ; il faudrait inspecter les structures antiérosives périodiquement surtout après une forte érosivité des pluies afin de s'assurer qu'elles fonctionnent normalement et d'examiner si elles ont besoin de réparation. Il faudrait également protéger les ouvrages de contrôle de l'érosion par une mise en défens afin d'éviter le pacage et le piétinement du bétail.

Les résultats qui ont été obtenus seront un préalable aux futures opérations de lutte contre l'érosion hydrique, au niveau de cette partie du bassin versant. Ils sont donc à considérer comme un apport important et un modèle dans la conception de l'aménagement des bassins versants menacés par l'érosion.

Les techniques proposées (techniques mécaniques, biologiques et mixtes) répondent aux critères de coût raisonnable et sont cohérentes avec les systèmes de culture ou de production existants. Mais il ne faut pas oublier que les bonnes techniques culturales appliquées au niveau des champs peuvent très largement prévenir les effets les plus néfastes de l'érosion.

5.2- Discussions

5.2.1- Indices d'érosivité des pluies

La représentation de l'érosivité est faite sur la base de l'interpolation des indices d'érosivité calculés à partir des précipitations journalières, mensuelles et annuelles pour chaque station, ainsi nous avons traduit les résultats obtenus sous forme d'une carte des risques d'érosivité des pluies.

Selon les valeurs obtenues par l'indice de Fournier, notre région d'étude est caractérisée par un risque d'érosivité moyen.

Pour l'indice de Fournier modifié par Arnoldus, ces valeurs sont semblables à celles obtenues par Maaliou (2010), au niveau de 35 stations aux bassins versants de l'Isser et des côtes algéroises, ces valeurs varient de 28,87 MJ.mm/ha.h.an pour la station d'El Omaria à 113,40 MJ.mm/ha.h.an pour la station de Yakourène avec une tranche pluviométrique varie de 416 mm à 1061 mm. Ces résultats confirment que l'érosivité des pluies augmente de l'Ouest vers l'Est du pays. Nahal (1984), confirme également que le risque d'érosivité des pluies dans le Tell oranais est faible et augmente du Sud vers le Nord et de l'Ouest vers l'est.

Au Maroc, Tribak et *al.* (2009), dans le bassin versant de l'Oued Tlata, montrent que l'indice d'érosivité d'Arnoldus est de 56,3 MJ.mm/ha.h.an pour une pluviométrie moyenne annuelle de 390 mm durant la période allant de 1977 à 1994.

Au Nord-Ouest de la Turquie, Demirci et Karaburun (2011) ont utilisé la formule d'Arnoldus pour déterminer l'érosivité des pluies dans le bassin versant de Buyukcekmece, sur une superficie de 63.000 ha caractérisé par des sols dégradés. La valeur moyenne de l'indice d'érosivité des pluies est de 123,2 MJ.mm/ha.h.an avec une pluviométrie moyenne de 650 mm sur une période de 32 ans.

Les valeurs obtenues par l'indice de Rango-Arnoldus sont comparables aux résultats avec celles obtenues :

- Dans le Rif oriental au Maroc, dans les 8 stations du bassin versant de l'Oued Boussouab, Sadiki (2005) mentionne des valeurs qui varient de 31,2 MJ.mm/ha.h.an à Anguied au Sud-Est du bassin à 60 MJ.mm/ha.h.an au Nord-Ouest avec une tranche de pluie de 124,5 à 351 mm pour la période allant de 1970 à 1999.
- Dans le bassin versant de l'Oued Leben au Maroc, Rahhou (1999) indique des valeurs qui varient de 43 MJ.mm/ha.h.an à 87,56 MJ.mm/ha.h.an .

- Dans le bassin versant de l'Oued Srou, Elbouqdaoui et *al.* (2005) mentionnent des résultats équivalents aux nôtres, sur un relief accidenté et des sols variables non résistants du fait d'une faible couverture végétale. Avec une pluviométrie moyenne annuelle qui oscille entre 337,2 mm pour la station de Tabouazant et 760,2 mm pour la station de Quiouane, ils ont trouvés deux classes d'érosivité des pluies dans un intervalle de 23,9 % dans la classe faible à 76,1 % dans la classe modérée.

5.2.2- Choix d'un indice d'érosivité des pluies dans le Nord-Ouest algérien

Les résultats obtenus à l'échelle locale et dans différentes régions, nous ont permis d'opter pour l'indice d'érosivité des pluies d'Arnoldus (1980). Ce choix a été fait pour les raisons suivantes : Les différents indices d'érosivité des pluies montrent que les valeurs de l'indice d'Arnoldus sont complètement différentes par rapport à l'indice de Fournier, cela s'explique du fait que : l'indice de Fournier prend en compte uniquement la pluviométrie du mois le plus arrosé. Par contre, l'indice d'Arnoldus prend en considération la pluviométrie mensuelle de tous les mois de l'année, ainsi les valeurs obtenues par cet indice sont très proches de la réalité de notre région. Arnoldus (1980) a montré que la corrélation entre l'indice de Fournier et R de Wischmeier n'était pas significative ($R^2 = 0,55$). Cet indice modifié présente une meilleure corrélation avec l'indice d'érosivité de Wischmeier et Smith (1978). Meddi (2013) a constaté que l'indice d'Arnoldus explique une grande partie de la dégradation spécifique par rapport à l'indice de Fournier dans les bassins versants du Tell oranais. Cet indice constitue une bonne approximation du facteur R de l'équation universelle dont la relation est linéaire. Arnoldus a obtenu des résultats satisfaisants pour 164 stations aux États-Unis et pour 14 stations en Afrique de l'Ouest. Il a montré la prédominance de l'indice d'Arnoldus, par rapport à d'autres indices, dans la représentation de l'agressivité des pluies. Selon les résultats de Rerboudj (2005), dans le bassin versant de l'Oued El-Hai (Sud des Aurès), le coefficient de corrélation entre les indices d'érosivité climatiques et la hauteur des pluies ($IF, R, IFA = f(Pan)$) est la plus convenable et varie de 0,88 pour Fournier, 0,98 pour R de Wischmeier et 0,99 pour Arnoldus. Ce dernier a été utilisé dans les études d'aménagement et pour la régionalisation de l'agressivité des pluies dans de nombreuses régions du monde (De Louis et *al.*, 2010).

Le coefficient de détermination est non significatif au seuil de 5 % ($R^2 = 0,380$) de l'indice d'Arnoldus avec l'indice de Fournier, alors qu'il est hautement significative au seuil de 5 % et 1 % ($R^2 = 0,999$) de l'indice d'Arnoldus avec l'indice de Rango-Arnoldus. A cet effet, si l'on compare les valeurs de l'indice d'érosivité d'Arnoldus et de Rango-Arnoldus, on remarque que les valeurs sont relativement proches avec une érosivité des pluies relativement élevée dans la zone littorale et on note une diminution de cette érosivité dans la zone Sud du Tell oranais.

L'utilisation de l'indice de Rango-Arnoldus reste très ponctuelle, peu d'auteurs l'ont adopté au Maroc, alors que l'indice d'Arnoldus s'adapte bien au climat méditerranéen. Plusieurs auteurs ont opté pour cet indice dans plusieurs pays : (Apaydin et *al.*, 2006) en Turquie, (Kouli and *al.*, 2008) en Grèce, (Elbouqdaoui et *al.*, 2005) et (El Garouani et *al.*, 2008) au Maroc, (Meddi, 2015) en l'Algérie et (Andoh et *al.*, 2012) au Ghana.

Roose (1994) a tenté d'estimer l'indice d'agressivité des pluies de Wischmeier et Smith à partir de l'indice d'Arnoldus et il a trouvé une bonne corrélation à l'échelle régionale entre ces deux indices. D'après Vrieling et *al.* (2010), l'étude appliquée pour la cartographie de l'érosivité des pluies en Afrique, a montré que l'indice d'Arnoldus atteint une corrélation beaucoup plus forte ($R = 0,84$) avec l'indice R de Wischmeier et Smith pour la période 1998-2008.

5.2.3- Rôle de la matière organique dans la stabilité structurale

La matière organique est le paramètre le plus déterminant dans la stabilité structurale y compris pour les marnes étudiées, elle a une influence positive sur la stabilité structurale (Monnier et Stengel, 1982). Elles favorisent l'agrégation des particules entre elles. En effet, les sols dont le taux de matière organique est supérieur à 1,8 %, ont une structure stable et par conséquent subissent moins l'érosion hydrique (Roose, 1994). La stabilité des agrégats du sol, dépend aussi de la proportion d'argile et sa saturation en calcium, les sols dans l'Ouest algérien riches en argiles saturées et en calcium sont résistants à la battance, mais restent très sensibles au ravinement (Morsli, 1996).

Les principales caractéristiques du sol qui influencent la stabilité structurale, sont la matière organique, la composition granulométrique et la teneur en calcaire.

La matière organique agit essentiellement sur la mouillabilité du sol (surtout en début d'humectation), cette influence est liée à la fois par sa quantité et sa localisation à la périphérie des agrégats (Boiffin, 1984). En effet, la matière organique améliore la structure du sol en permettant l'association des agrégats du sol et en augmentant la porosité ce qui favorise l'infiltration de l'eau lorsque le sol est humide. Il y a lieu de préciser aussi que le système racinaire ramifié, fissure les sols et crée une sorte de réseau de canalisation souterraine qui ne fait qu'augmenter l'infiltration des eaux dans le sol.

Le mélange argilo-humique forme des agrégats plus stables et procure au sol de nouvelles propriétés physico-chimiques favorables à sa fertilité, donc les résidus de la végétation constitue une source de matière organique très utile qui améliore la fertilité des sols et les rend moins sensibles à la dégradation (Mhiri, 1970). La matière organique joue le rôle de ciment qui maintient la structure du sol, et le rend perméable à l'eau et plus résistant au choc des gouttes de pluie et au ruissellement. Sur le plan textural, la texture fine empêche l'infiltration de l'eau et permet le

déclenchement du ruissellement. Cela signifie que la texture fine est plus sensible à l'arrachement que la texture moyenne.

Le sol stable et de structure aérée favorise l'infiltration et permet d'éviter le compactage du sol et par conséquent une diminution du ruissellement. Cela favorise également la rétention des éléments nutritifs indispensables aux plantes (Souadi, 2011), car le complexe absorbant a un pouvoir anionique (chargé négativement) qui empêche la lixiviation (le lessivage) des éléments cationiques (chargés positivement : NH_4^+ , H^+ , etc.) ce qui est très utile pour la nutrition de la plante (Briand, 2000).

Monnier et Stengel (1982), ont élaboré un triangle textural où les sols limoneux apparaissent comme les plus instables à l'inverse des sols argileux. Par ailleurs, ces deux auteurs démontrent que les sols à texture plus grossière sont moins sensibles au détachement par la pluie du fait de la masse plus importante de leurs particules ou de la plus grande stabilité des agrégats. L'intérêt des limites d'Atterberg pour un sol dont les limites de liquidité et de plasticité sont faibles et facilement affecté par la solifluxion à la moindre pluie, ainsi la connaissance de ces limites permet d'expliquer de nombreux glissements ou même de les prévoir.

5.2.4- Effet des minéraux argileux sur l'évolution du sol

Les argiles constituent la fraction la plus fine du sol. Selon Lamouroux (1971), les minéraux argileux sont des constituants actifs du sol de par les multiples rôles aussi bien chimiques que physiques qu'ils peuvent jouer. En effet, c'est à ce niveau que se passe un grand nombre de processus importants comme l'adsorption sur le complexe absorbant ou la rétention de l'eau, la genèse, l'évolution des sols et la nutrition minérale des plantes.

Les minéraux argileux sont des maillons principaux du fonctionnement et de la durabilité des sols, elles présentent une importante réactivité chimique (échange ionique) qui les rend sensibles aux variations des conditions biogéochimiques du milieu. Ces variations des conditions biogéochimiques influent sur leurs structures cristallines et sur leurs propriétés cristallographiques (Hubert, 2008).

Les substrats marneux et argileux du Tell oranais sont constitués par des minéraux hétérogènes dont la forte affinité pour l'eau, Ils comportent une grande proportion de minéraux argileux telles que l'illite, la Chlorite, la Kaolinite, la montmorillonite, les smectites...etc.

Les minéraux argileux perdent les forces capillaires suite à l'absorption de molécules d'eau sur la surface extérieure des particules, et leur pénétration entre les feuillets, ce qui facilite l'altération des marnes lors de l'alternance des phases d'humectation et de dessiccation.

Les paramètres intrinsèques des sols influent principalement sur la structure minéralogique de l'argile (mélange d'illite et montmorillonite) qui rend le sol très sensible au phénomène de

gonflement des argiles comme dans notre cas. Selon Bufalo (1989), la désagrégation des marnes à la suite des cycles humectation - dessiccation étant proportionnelle à la pression de gonflement spécifique de chaque type d'argile, se traduit souvent, malheureusement à l'arrachement et la dissolution de la pellicule d'altération des roches et au mouvement de masse (glissement) suite à l'humectation et par la suite forme un danger contre les infrastructures locales.

L'illite est très sensible aux variations du milieu et constitue un excellent indicateur de l'évolution des sols. Il permet de déceler l'origine et l'homogénéité d'un matériau (composition des interstratifiés de l'illite-montmorillonite). La transformation de l'illite en montmorillonite se réalise par un mécanisme qui consiste en un lessivage progressif des ions alcalins et alcalino-terreux et un enrichissement relatif du feuillet en silicium (Tardy, 1969).

Kouri et Vogt, (1996), ont observé une augmentation des proportions d'interstratifiés des horizons profonds vers la surface, ceci tend à montrer une sensibilité accrue à l'altération des horizons superficiels. La transformation d'illite et montmorillonite en interstratifiés est fréquente dans les marnes brunes armées de calcaire et vert-clair armées de grès. Les interstratifiés peuvent être considérés comme des édifices proches des smectites gonflantes, les feuillets de smectites peuvent s'intercaler régulièrement ou irrégulièrement avec d'autres feuillets illitiques, l'ensemble forme des interstratifiés qui s'écartent à 18 \AA , pour cela la surface spécifique augmente et donne un potentiel de gonflement plus élevé (Wakim, 2005).

Le phénomène de gonflement est influencé par la nature des cations interfoliaires. La teneur en kaolinite dans cette zone se maintient dans tous les échantillons, il a un pouvoir d'échange de cations faible, parce que leur constitution rend l'accès entre les couches minérales presque impossible à cause des fortes liaisons entre elles. Les observations de Bultel (2001), au microscope électronique à balayage ont permis d'analyser l'évolution de la texture de la kaolinite au cours du gonflement, cette analyse met en évidence le type inter-agrégats de la Kaolinite au niveau des pores interstitiels alors que pour les smectites, le gonflement est de type intra-agrégats, c'est-à-dire entre les feuillets.

Les propriétés des montmorillonites ou smectites et leur capacité de gonflement résultent de la présence d'eau dans l'espace entre les feuillets. Les montmorillonites sont généralement calciques, plus rarement sodiques sauf dans les marnes vert-clair armées de grès avec 8,32 (85 % d'interstratifiés) alors que dans les marnes bleues compactes, le taux de calcium est élevé avec 26,80 méq/ 100 g avec une faible valeur (25 %) d'interstratifiés mais le calcium est élevé dans tous les échantillons (26,80 méq/100g). Dardaine et Lajudie (1985), confirment d'une montmorillonite sodique gonfle plus qu'une montmorillonite calcique. En effet, le rayon ionique de Na^+ est plus proche de la taille de la molécule d'eau et son interaction avec l'eau est plus faible que pour Ca^{++} .

La nature minéralogique des constituants : la stabilité des agrégats peut varier énormément suivent la nature des minéraux argileux, du fait de leurs propriétés de gonflement à l'eau. Les phénomènes de gonflement-retrait qui interviennent lors des cycles d'humectation dessiccation des particules argileuses entraînent une microfissuration des agrégats qui ne se traduit pas systématiquement par une désagrégation mais facilite les désagrégations ultérieures. La transformation de l'illite-montmorillonite en interstratifiés dans la partie occidentale du bassin versant de l'Oued Mina favorise le gonflement des minéraux et par conséquent la dégradation des sols.

Les sols analysés sont identifiés comme une argile marneuse très plastique et ayant un potentiel de gonflement très élevé ; le gonflement étant pour partie dû à la structure minéralogique du sol (teneur élevée en montmorillonite) et aux variations de sa teneur en eau (cycles de dessiccation-réhumidification du sol).

Kouri et Gomer, (2010) notent que l'évolution du sol varie selon le type des affleurements : les marnes vert-clair et grises évoluent par incision des parois des ravines (photo 10), les marnes bleues compactes évoluent par glissement pelliculaire dans les parois de ravins alors que les marnes brunes évoluent par suffosion et glissement rotationnels (photo 11).



Photo 10 : Incision des parois de la ravine sur marnes vert-clairs



Photo 11 : Erosion régressive de la ravine

5.2.5- Relation entre la stabilité structurale et d'érodibilité en fonction de la lithologie

La structure est stable ($I_s = 1,02$) pour les sols calcaires-marnes et très instable ($I_s = 2,15$) pour les sols peu évolués d'apport alluvial. D'après les travaux de Morsli *et al.* (2004) dans l'Ouest Algérien, l'indice d'instabilité structurale (I_s) montre que les sols bruns vertiques de texture argileuse très fréquents dans cette région, sont les plus résistants ($I_s < 1$) et les moins érodibles ($0,14 \leq K \leq 0,19$). Ces sols présentent une bonne stabilité structurale et une perméabilité très élevée. Les sols de texture limoneuse caractérisés par une proportion élevée en limon et en sables fins avec peu de matière organique dans l'horizon de surface ont une structure instable ($I_s > 1,2$) avec un

indice d'érodibilité compris entre 0,15 et 0,25. Ces auteurs ont aussi montré que l'indice d'érodibilité est élevé dans l'Ouest algérien. Les valeurs de K varient entre 0,26 à 0,48, ce qui correspond aux classes : moyennement à très sensibles. Malgré les faibles valeurs des indices d'érosivité des pluies, l'activité de l'érosion est toujours intense dans les substrats argileux fréquents dans quelques zones du Tell oranais. La représentation spatiale des classes de l'érodibilité des sols par Toumi et *al.* (2013) a fait ressortir une bande de sols, située en amont de la plaine agricole du périmètre d'irrigation de la partie Nord-Ouest occidentale de l'Oued Mina. Cette zone présente une classe d'érodibilité élevée occupant 20 % de la superficie totale du bassin versant, le facteur K varie, selon la lithologie. Vita-Finzi (1969) a confirmé que, dans le bassin méditerranéen, les vallées présentent des terrasses de remblaiement limoneuses, ce qui témoigne de la dégradation des sols et de l'érosion hydrique.

Concernant nos échantillons, les valeurs du facteur d'érodibilité K, sont comprises entre 0,14 (moyennement érodable) pour les marnes bleues compactes et calcaires, ces formations une bonne stabilité structurale et une teneur élevée en calcium et une cohésion élevée. Les sols peu évolués d'apport alluvial caractérisés par une texture argileuse très instable et sensible à la battance, sont très fortement érodables ($K = 0,58$).

L'indice d'érodibilité K est variable dans le temps et l'espace, en fonction de l'évolution de la matière organique, des propriétés physiques du sol (texture, structure, perméabilité).

L'érodibilité n'est donc pas dépendante uniquement des propriétés intrinsèques du sol mais aussi des effets variés des techniques culturales (Roose et Sarrailh, 1989). L'apport de la matière organique dans le sol favorise l'agrégation des particules entre elles. Dans un sol limoneux labourable, un taux de matière organique de 2,5 % à 3% est considéré comme bon, mais devant une grande variabilité du facteur K, il faut suivre l'érodibilité sur plusieurs années sous différentes pratiques culturales et différents types de climat.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Au terme de ce travail, nous pouvons dire que le climat du Tell oranais est de type méditerranéen caractérisé par :

- Une pluviométrie moyenne annuelle faible (231 mm à 400 mm) ;
- Une concentration de pluies pendant la période froide (automne et hiver) ;
- Une période sèche assez longue (Avril à Octobre) ;

Des températures fortes en saison estivale et basses en saison hivernale (la moyenne des maximums du mois le plus chaud (M) de 37,77 °C, en juillet pour la station d'Oued Sly et la température minimale (m) du mois le plus froid de -2,2 °C en janvier pour la station d'El Aricha.

La connaissance de la distribution de l'érosivité des pluies à l'échelle du Tell oranais présente un grand intérêt, car elle permet de distinguer au cours de l'année les périodes durant lesquelles les pertes en terre sont les plus élevées. Le développement de quelques indices d'érosivité des pluies sont considérés comme des outils précieux pour la prévision de l'érosion potentielle de la région. La variabilité spatiale de l'érosivité des pluies, permet de classer les zones vulnérables au détachement des particules du sol constituant par la suite la source de départ des sédiments ceci permet de déterminer les zones d'intervention prioritaire en matière de conservation des sols.

La cartographie de l'érosivité des pluies à l'échelle du Tell oranais sur la base des valeurs des indices d'érosivité des pluies, nous amène aux conclusions suivantes :

Les valeurs de l'indice d'érosivité des pluies les plus élevées sont enregistrées au niveau des stations du littoral du Tell oranais, les valeurs d'érosivité les pluies élevées coïncident avec les pluies les plus fortes.

La tranche pluviométrique de 300 à 350 mm est dominante représentant 72,44 %, de la superficie totale du Tell oranais. Selon l'indice de Fournier, l'érosivité de la classe [1-10] couvre une superficie importante avec 81,91 %. Cependant, selon l'indice d'Arnoldus, une dominance de l'érosivité de pluies de la classe moyenne [30-40] représente 85 %, localisée dans le centre de notre région. Alors que pour l'indice de Rango-Arnoldus, la classe d'érosivité dominante est la moyenne [45-55] représentée par une surface de 75,04 %.

Pour l'indice de Deffontaines, la forte classe d'érosivité des pluies [60-100] se concentre au niveau du littoral durant l'automne et hiver sur une faible superficie respectivement de 0,48 % et 0,51 %.

La faible classe d'érosivité des pluies [0-30] couvre plus la moitié de superficie de la région avec 57,60 % en automne, 54,44 % en hiver et 58,73 % au printemps. En été, nous signalons que la faible classe d'érosivité des pluies [0-15] couvre l'ensemble du Tell oranais (100 %). A cet effet, l'érosivité des pluies est élevée durant l'automne, l'hiver et le printemps.

Les grilles d'interprétation montrent que les risques d'érosivité dans notre région sont faibles à moyens. Malgré cela les risques d'érosion sont élevés durant l'automne et l'hiver. Par ailleurs, le risque érosif est moindre à la fin du printemps compte tenu du développement de la végétation à cette période. On remarque aussi une variation spatiale du risque, on observe une forte érosivité dans le secteur littoral et augmente du Sud vers le Nord et de l'Ouest vers l'Est.

Le meilleur choix pour l'évaluation de l'érosivité des pluies dans l'Ouest algérien est l'indice d'Arnoldus. Cet indice a donné une corrélation très significative avec le facteur d'agressivité des pluies par rapport aux autres indices utilisés, dans la représentation de l'agressivité des pluies, il constitue une bonne approximation de ce facteur R de l'équation universelle de perte de terre de Wischmeier et Smith. L'élaboration de la carte de risque d'Arnoldus oriente sur la tendance évolutive du milieu et sur les choix des techniques et des moyens devant être mis en œuvre pour stabiliser la situation et permet également d'approfondir notre compréhension en matière de transport de sédiments.

Le facteur de l'érosivité des pluies n'est pas à lui seul déterminant des phénomènes érosifs dans le Tell oranais, mais conjugué avec d'autres facteurs intrinsèques du substrat qui caractérisent le milieu, car d'après les analyses physico-chimiques et mécaniques des échantillons prélevés dans les deux zones test à l'échelle du Tell oranais et le traitement au moyen de l'analyse factorielle des correspondances (AFC) a mis en évidence les liens entre les variables explicatives et les indicateurs d'érodibilité. L'analyse statistique de ces résultats par les méthodes d'AFC apporte plus d'éclaircissement et permet une meilleure interprétation quant à la contribution des principaux facteurs intrinsèques qui contrôlent l'érosion. La résistance des sols à l'érosion dépend des liaisons existantes entre les paramètres intrinsèques constituant le substrat :

Les échantillons qui résistent mieux aux forces provoquées par le ruissellement sont caractérisés par une texture argilo-limoneuse à argileuse et une structure stable avec un risque faible de battance, la perméabilité est modérée, l'indice de plasticité varie entre moyennement plastique à plastique et la cohésion entre les particules est élevée avec une aptitude à la fissuration moyenne à excellente. Le taux élevé de matière organique et de carbonate de calcium et la faible teneur en sodium favorisent la stabilité structurale. La proportion élevée d'illite favorise la stabilité des agrégats et par conséquent leur résistance aux phénomènes de gonflement.

Les échantillons fortement érodibles en raison de la texture limoneuse sont caractérisés par une faible cohésion des particules de sol, une forte instabilité structurale et un risque élevé de battance. Les formations d'aptitude moyenne à la fissuration et moyennement plastique jouent un rôle important dans les processus d'érosion en masse. La proportion élevée d'interstratifiés favorise l'altération suite à l'alternance des phases d'humectation et de dessiccation.

L'érodibilité des sols est un processus d'interaction complexe de nombreux facteurs, ces derniers très complexe et variable dans le temps et dans l'espace en fonction du type de sol, des pluies mais aussi du relief, du couvert végétal et des propriétés physiques liées à celles-ci et aux techniques culturales qui modifient les états de la surface du sol et en fonction des saisons mais aussi de l'évolution de la matière organique.

L'utilisation de l'approche télédétection/SIG/USLE est fortement recommandée comme outil de modélisation rapide et peu coûteux pour estimer les pertes en sol par l'érosion hydrique. Ce modèle est basé sur des lois mathématiques appliquées en utilisant des facteurs calculés et déterminés à l'aide des observations de terrain et des analyses aux laboratoires afin de spatialiser les cinq facteurs (R, K, LS, C, P) et élaborer la carte des pertes de sol.

Les résultats obtenus montrent que la partie occidentale du bassin versant de l'Oued Mina subit une perte moyenne de 11,38 t/ha/an et plus de 50 % de la superficie totale de notre test est sous le risque d'érosion supérieur au seuil de tolérance (7,41 t/ha/an). Cette perte résulte de l'interaction de plusieurs facteurs qui se conjuguent aussi pour accélérer l'érosion de même que de la prédominance des formations lithologiques marneuses et de couverture végétale dégradée, des activités agricoles et des terrains accidentés. L'utilisation de cette technique a permis d'évaluer l'érosion à l'échelle de la partie occidentale du bassin versant de l'Oued Mina et l'identification des zones menacées par ce phénomène d'érosion. Elle permet aussi de suivre l'impact de l'utilisation des sols et des aménagements sur la qualité des ressources en sol.

La méthode des pertes en sol établies par RUSLE apporte aussi une aide importante aux décideurs et aux aménageurs pour simuler des scénarios d'évolution de cette zone et suivi des dynamiques d'occupation du sol, et d'apporter une meilleure description des facteurs LS, K, C afin d'affiner l'estimation des pertes de sol et planifier les interventions de lutte contre l'érosion en nappe et linéaire.

Il faut noter que malgré les faibles valeurs des indices d'érosivité, l'érosion continue à prendre des proportions considérables comme en témoignent les versants ravinés, les paysages très dégradés et la fréquence des inondations. Cette situation semble indiquer que la forte vulnérabilité des terrains (roches tendres, sols fragiles peu profonds et pentes fortes), l'alternance de périodes sèches et humides et l'impact défavorable des activités humaines (déforestation, incendies, mauvaises pratiques culturales...etc.) favorisent le détachement et le transport des particules du sol vers les retenues.

Les actions d'aménagement des bassins versants présentent un enjeu majeur dans la mesure où ils visent à favoriser la stabilité structurale et l'infiltration des eaux. La conservation des sols est liée à celle de l'eau d'où le rôle majeur de la couverture végétale, de l'état de surface du sol et de

l'aménagement des résidus de culture en surface qui règlent pour une bonne part les activités biologiques et les propriétés physiques de l'horizon superficiel. L'amélioration des systèmes de culture doit se faire en liaison étroite avec les futurs utilisateurs de façon qu'ils soient conçus pour répondre exactement aux besoins des paysans avec un minimum de contraintes. L'efficacité de ces systèmes dépendra de la façon dont ils seront appliqués et surtout de leur suivi. Aussi, l'aménagement des bassins versants doit être décliné en projets de développement intégré impliquant tous les opérateurs et partenaires concernés et visant, en plus de la régularisation du ruissellement à travers des traitements mixtes appropriés, l'amélioration des conditions de vie des populations locales. Un effort d'adaptation des techniques culturales reste à faire pour mettre au point des systèmes techniquement performants et économiquement viables à courte durée.

Il serait intéressant d'utiliser des images satellites à très haute résolution pour une connaissance plus approfondie de l'occupation du sol allant jusqu'à la détermination des espèces végétales et l'état d'évolution des différentes formes d'érosion hydrique dans le Tell oranais en vue d'affiner la stratégie de lutte antiérosive et réduire les conséquences du phénomène érosif dans la région.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES



Références bibliographiques

- Achite M. et Meddi M., 2005-** Variabilité spatio-temporelle des apports liquides et solides en zone semi-aride. Cas du bassin versant de l'Oued Mina (Nord-Ouest Algérien). *Revue des Sciences de l'Eau*. Numéro spécial (18), 37-56.
- Alcaraz C., 1977-** Contribution à l'étude de la végétation dunaire du littoral oranais (Ouest algérien). *C. R. Acad. Sc. Série. D.* 375 p.
- Alcaraz C., 1982-** *La végétation de l'Ouest algérien*. Thèse doct. Es-sci. Univ. Perpignan, 415 p + annexes.
- Al Karkouri J., 2003-** *Dégradation du milieu naturel dans le bassin de Beni Boufrah (Rif central-Maroc): analyse des facteurs et des processus, essai de quantification et modélisation spatiale*. Thèse doc. Etat, Univ. Mohamed V, Faculté des Lettres, Rabat, 392 p.
- Apaydin H., Erpul G., Bayramin I. and Gabriels D., 2006-** Evaluation of indices for characterizing the distribution and concentration of precipitation: A case for the region of Southeastern Anatolia, Project Turkey *J.Hydrol.* 328: 726-732.
- Andoh H.F., antwi B.O., Wakatsuiki T. and Atakora E.T., 2012-** Estimation of soil erodibility and rainfall erosivity patterns in the agroecological zones of Ghana, *Journal of Soil Science and Environmental Management* Vol. 3(11): 275-279. doi: 10.5897/JSSEM11.081.
- Arabi M. et Roose E., 1989-** Influence de quatre systèmes de production en zone méditerranéenne en moyenne montagne en Algérie. *Bull. Réseau Erosion*, (9), 39-51.
- Arnoldus H.M.J., 1980-** Methodology used to determine the maximum average soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco. *Bull. FAO*, (34), 39-48.
- Aubert G. et Monjauze A., 1946-** Observations sur quelques sols de l'Oranie Nord Occidentale Influence du déboisement, de l'Erosion, sur leur évolution. *Compte-rendu sommaire des Séances de la Société de Biogéographie*, tome 23, (199), 44-51.
- Aubert G., 1978-** Méthodes d'analyses du sol. 2ème Edition C.N.D.P. Marseille. 199 p.
- Baahmed D., 2015-** *Bilan hydrique et évaluation des ressources en eau superficielle du bassin de la macta*. Doct. Es-sci. Univ. Mohamed Boudiaf d'Oran. 167 p.
- Babau M.C., 1983-** The erosive capacity of rainfall. *World Climate Programme Series, Rapport PCM-41*, WMO, 28 p.
- Bachir Boudjra S.E., El Zerey W. et Benabdeli K., 2011-** Etude diachronique des changements du couvert végétal dans un écosystème montagneux par télédétection spatial : cas des monts de Tessala (Algérie occidentale). *Géographie Physique et Environnement*V, 211-224.
- Bahri F. and Saibi H., 2010-** Characterisation, classification, and evaluation of some groundwater samples in the Mostaganem area of north western Algeria, *Arabian Journal of Geosciences, Volume 3, Issue 1*: 79-89. doi: 10.1007/s12517-009-0062-0.
- Bagnouls S.F. et Gaussen H., 1953-** Saison sèche et indice xérothermique. *Bull. Soc. Hist. Nat.*, Vol. 8, 193-239.
- Benabdeli K., 1996-** *Aspects physionomico-structuraux et dynamique des écosystèmes forestiers faces à la pression anthropozoogène dans les monts de Tlemcen et les Monts de Dhaya. Algérie occidentale*. Doct. Es-sci. Univ. Djilali Liabes de Sidi Bel Abbés. 356 p + annexes.
- Benchetrit M., 1972-** L'érosion actuelle et ses conséquences sur l'aménagement en Algérie. *Ed. Presses universitaires de France, Paris*, 216 p.



- Benchettouh A., Kouri L. et Jebari S., 2017-** Spatial estimation of soil erosion risk using RUSLE/GIS techniques and practices conservation suggested for reducing soil erosion in Wadi Mina watershed (northwest, Algeria). *Arabian Journal of Geosciences*, (10:79). 14 p. doi 10.1007/s12517-017-2875-6.
- Benmoussa M., Elyamani M. et Saidi A., 1993-** Application de l'équation universelle de perte en sol au bassin versant de l'oued Tasrafet. *Géo-Observer, Rabat*, 3, 59-70.
- Boiffin J., 1984-** *La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies*. Thèse Doc. Ing. I.N.A.P.G, Paris, 320 p.
- Boiffin J., 1985-** Stages and times dependancy of soil crusting in situ. Inter. Sym. On the assessment of soil surface sealing and crusting. Proc. Of international symposium, Ghent, Belgium, 91-98.
- Bou Kheir R., Girard M.C., Khawlie M. et Abdallah C., 2001-** Apport de la télédétection pour la modélisation de l'érosion hydrique des sols dans la région côtière du Liban. *Télédétection, Vol. 2, (2), contemporary publishing international*. 79-90.
- Briand C., 2000-** *Ma culture biologique*. Éditions Cheminements, France. pp. 33-37.
- Bufalo M., 1989-** *L'érosion des terres noires dans la région de Buech (Hautes-Alpes, France)*. Thèse de doctorat en géologie, Aix-Marseille III, 230 p.
- Bultel F., 2001-** *Prise en compte du gonflement des terrains pour le dimensionnement des revêtements des tunnels*. Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 289 p.
- Casenave A. et Valentin C., 1989-** Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltrabilité. *Ed. Orstom, Coll. Didactiques, Paris*, 227p.
- C.E.C (Commission of European Communities), 1992-** Corine soil erosion risk and important land resources in the southern regions of the European Community. Brussels, *Commission of the European Community EUR 13233 EN, Luxemburg, Office for official Publications of the European Community*, 97 p.
- Chebbani R., Djilli K. et Roose E., 1999-** Etude à différentes échelles des risques d'érosion dans le bassin versant de l'Isser. *Bull. Réseau-Erosion (17), Ed. IRD, Montpellier*, 85-95.
- Collinet J. et Zante P., 2005-** Analyse du ravinement de bassins versants à retenues collinaires sur sols à fortes dynamiques structurales (Tunisie). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*. Vol 11, (1): 61-74. <http://geomorphologie.revues.org/257>.
- Daghmoumi R., 1994-** *Apport de la géologie et du SIG à l'étude des bassins versants de l'Aoudour (Rif central)*. Thèse 3^{ème} cycle, Univ. Mohammed V, Fac. Sci. Rabat, 162 p.
- Dardaine M. et Lajudie A., 1985-** Gonflement et pression de gonflement d'argiles compactées. *Note technique C.E.A., SESD/ 85.18*.
- Debrach J. 1953-** Notes sur les climats du Maroc occidental. *Maroc médical*, (342) : 1122-1134.
- Deffontaines J.P. et De Montard F., 1968-** Essai d'appréciation du danger d'érosion dans les vergers de forte pente en moyen Vivarais. *Annales agronomiques 19(3)*, 349-364.
- Dellaoui A., 1952-** Géologie des monts de Tessala Alger 1952. *Monographies régionales, 1^{ère} série : Algérie (24)*, 1-18.
- De Luis M., Gonzalez J.C. and Longares L.A., 2010-** Is rainfall erosivity increasing in the Mediterranean Iberian peninsula? *Land Degrad. Develop. 21*: 139-144.
- Demmak A., 1982-** *Contribution à l'étude de l'érosion et les transports solides en Algérie septentrionale*. Thèse de Doct.-Ing., Université P.M.Curie, Paris 6, 323 p.



- Demirci A. and Karaburun A., 2011-** Estimation of soil erosion using RUSLE in a GIS framework: a case study in the Buyukcekmece. Lake watershed, northwest Turkey. *Environ Earth Sci* 66: 903-913. doi: 10.1007/s12665-011-1300-9.
- Desmet P.J. and Govers G., 1996-** Comparisons of routing algorithms for digital elevation models and their implications for predicting ephemeral gullies. *International Journal of Geographical Information Systems*. 10. 3: 311-331.
- Diallo A., 2000-** *Intégration du modèle USLE dans un SIG pour la cartographie de l'érosion hydrique dans le bassin versant de Beni Boufrah (Rif central)*, Mémoire de troisième cycle, ENFI, Salé, 90 p.
- Djebaili S., 1978-** *Recherche phytoécologiques et phytosociologiques sur la végétation des hautes plaines steppiques et de l'Atlas Saharien Algérien*. Thèse. Doct. Univ. Languedoc. Montpellier. 229 p + annexes.
- Drolet J.Y. et Gagné G., 1989-** Etude des sols défrichés du comté de Rimouski. *Direction générale du développement agricole*. Agriculture Canada. 197 p.
- Dumas J., 1965-** Relation entre l'érodibilité des sols et leurs caractéristiques analytiques. *Cah. Orstom Pedol.* 3(4), 307-333.
- Elbouqdaoui K., Ezzine H., Badrahoui M., Rouchdi M., Zahraoui M. et Ozer A., 2005-** Approche méthodologique par télédétection et SIG de l'évaluation du risque potentiel d'érosion hydrique dans le bassin versant de l'Oued Srou (Moyen Atlas, Maroc). *Geo-Eco-Trop*, 29: 25-36.
- El Garouani A., Merzouk A. et Ozer A., 2003-** Cartographie et évaluation quantitative de l'érosion hydrique au pré-Rif marocain. *Hydrology of die Mediterranean and Semiarid Regions (Proceedings of an international symposium held at Montpellier, April 2003)*. IAHS Publ. no. 278.
- El Garouani A., Chen H., Lewis L., Tribak A. et Abharour M., 2008-** Cartographie de l'utilisation du sol et de l'érosion nette à partir d'images satellitaires et du SIG Idrissi au Nord-Est du Maroc. *Télédétection*, 8 (3): 193-201.
- Emberger L., 1955-** Une classification biogéographique des climats. *Rec. Trav. Lab. Bot. Géol. Zool. Univ. Montpellier, série Bot.*, (7), 3-43.
- Farres P.J. and Cousen M., 1985-** An improved method of aggregate stability measurement. *Earth Surface Processes and Landform*, vol. 10, 321-329.
- Ferro V., Porto P. and Yu B., 1999-** A comparative study of rainfall erosivity estimation for southern Italy and southeastern Australia. *Hydrological Sciences Journal*, 44 (1), 3-24. doi : 10.1080/02626669909492199.
- Fournier F., 1960-** Climat et érosion : la relation entre l'érosion du sol par l'eau et les précipitations atmosphériques. *Presses universitaires de France. Paris*, 201 p.
- Gomer, D., 1994-** Ecoulement et érosion dans les petits bassins versants à sols marneux sous climat semi-méditerranéen. *Coopération technique Algéro-allemande. GTZ-ANRH, Allemagne*.
- Greco J., 1966-** L'érosion - la défense et la restauration des sols - le reboisement en Algérie. *Ed. M.A.R.A., Alger*, 393 p.
- Halitim A., 1988-** Sols des régions arides d'Algérie. *OPU. Alger*. 384 p.
- Heddadj D., 1997-** La lutte contre l'érosion en Algérie. *Bull. Réseau - Erosion (17)*, Ed. IRD, Montpellier, 168-175.
- Henin S., 1938-** *Etude physico-chimique de la stabilité structurale des terres*. Thèse de Doctorat, Science des sols. Université de Paris, 70 p.



- Henin S. et Monnier G., 1956-** Evaluation de la stabilité de la structure du sol. *C.R.VI congrès Int. Sci. du sol. Paris, Vol. B:* 49-52.
- Hubert F., 2008-** *Modélisation des diffractogrammes de minéraux argileux en assemblages complexes dans deux sols de climat tempéré. Implications minéralogique et pédologiques. Terre solide et enveloppe superficielle.* Poitiers, Faculté des Sciences Fondamentales et Appliquées. Université de Poitiers : 223 p.
- Jebari S., Berndtsson R., Olsson J. et Bahri A., 2012-** Soil erosion estimation based on rainfall disaggregation. *J. Hydrol.* 436–437:102-110.
- Kalman R., 1970-** Ruissellement et érosion en nappe (Expérimentation au simulateur de pluie), *Annales de la Recherche Forestière au Maroc*, vol. 12, Rabat, 177-287.
- Kouli M., Soupios P. and Vallianatos, F., 2008-** Soil erosion prediction using the Revised Universal Soil Loss Equation (Rusle) in a GIS framework, Chania, Northwestern Crete, Greece. *Environ Geol* (2009) 57: 483-497. doi: 10.1007/s00254-008-1318-9.
- Kouri L., 1993-** *L'érosion hydrique des sols dans le bassin versant de l'oued Mina. Etude des processus et type de fonctionnement des ravins dans la zone des marnes tertiaires.* Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg, France.
- Kouri L. et Vogt H., 1996-** Détermination de la sensibilité des terrains marneux au ravinement au moyen de système d'information géographique. Bassin versant de l'Oued Mina, Tell oranais, Algérie. *Bulletin de l'Orstom*(16), 412-438.
- Kouri L., Vogt H. et Gomer D., 1997-** Analyse des processus d'érosion hydrique linéaire en terrain marneux. Bassin versant de l'oued Mina. Tell Oranais. Algérie. *Bull. réseau érosion* (17), 64-73.
- Kouri L. et Gomer D., 2010-** Analyse des processus de ravinement et détermination de la sensibilité des terrains marneux dans le Tell oranais Algérie. *Revue science et changements planétaires/sécheresse*, 21(4), 257-265.
- Lamouroux M., 1971-** *Etudes de sols formés sur roches carbonatées. Pédogenèse fersialitique au Liban.* Thèse Sci. Strasbourg. Mém. Orstom, 56, 266p.
- Laouina A. (1992)-** Recherches actuelles sur l'érosion au Maroc. *Bulletin du Réseau Érosion*, vol. 12, 292-299.
- Laouina A., 2007-** Gestion conservatoire des eaux et des sols au Maroc : la diversité des réponses paysannes à la dégradation des terres. *Publ. de la FLSH, Univ. Mohammed V Agdal, Rabat*, 172 p.
- Laouina A., 1998-** Dégradation des terres dans la région méditerranéenne du Maghreb. *Bull. Réseau érosion n° 18, Ed. IRD, Montpellier*, 33-53.
- Latrille E., 1979-** *Cours sur l'érosion et les techniques de lutte anti-érosives*, 58 P.
- Le Bissonnais Y., 1988-** *Analyse des mécanismes de mobilisation et de déplacement des particules à la surface du sol sous l'action des pluies.* Thèse de Doctorat. Univ. Orléans, Ardon, 196 p.
- Le Bissonnais Y. and Singer M.J., 1992-** Seal formation, runoff and interrill erosion from 17 California soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56: 1898-1903.
- Le Bissonnais Y., Singer M.J. and Bradford J.M., 1993-** Assessment of soil erodibility: the relationship between soil properties, erosion processes and susceptibility to erosion. *Farmland erosion : In temp. planis Environmentand Hills*, 87-96.



- Le Bissonnais Y. et Le Souder C., 1995-** Mesurer la stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à la battance et à l'érosion. *Etude et gestion des sols 2-1*: 43-56.
- Le Bissonnais Y. and Arrouays D., 1997-** Aggregate stability and assessment of soil crutability and erodibility II. Application to humic loamy soils with various organic carbon contents. *Eur. J. Soil. Sci*, 48: 39-48.
- Le Bissonnais Y., Chenu C., Arrouays D. et Cedron O., 2002-** Mécanismes d'action des matières organiques sur la structure et l'érodibilité du sol. *Colloque International de Montpellier*. 53 p.
- Ludwig B., 1992-** *L'érosion par ruissellement concentré des terres cultivées du Nord du Bassin Parisien : analyse de la variabilité des symptômes d'érosion à l'échelle du bassin versant élémentaire*. Thèse de doctorat Université Louis Pasteur Strasbourg, 190 p.
- Maaliou A., 2010-** *Contribution à l'étude de l'impact de l'érosivité des pluies sur le transport solide de quelques grands bassins versants*. Thèse de Magister USTHB. 75 p + annexes
- Masson J. M., 1971-** *L'érosion des sols par l'eau en climat Méditerranéen. Méthodes expérimentales pour l'étude des quantités érodées à l'échelle du champ*. Thèse de Docteur-Ingénieur, USTL Montpellier, 213 p.
- Mazour M., 2004-** *Etude des facteurs de risque du ruissellement et de l'érosion en nappe et conservation de l'eau et du sol dans le bassin versant de l'Isser-Tlemcen Algérie*. Thèse de doctorat d'Etat en foresterie. 184 p.
- Meddi M., 1992-** *Hydro-pluviométrie et transport solide dans le bassin versant de l'Oued Mina (Algérie)*. Doct. Thèse Uniq., Université Louis Pasteur -Strasbourg, 285 p.
- Meddi H. et Meddi M., 2009-** Variabilité des précipitations annuelles du Nord-Ouest de l'Algérie. *Sécheresse*, vol. 20, (1), 57-65.
- Meddi M., 2013-** Sediment transport and rainfall érosivity evolution in twelve Basins in Central and Western Algeria. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, V.7, (2): 253-263. doi: 10.4090/juee.2013.v7n2.253263.
- Meddi H., Meddi M. and Assani A., 2014-** Study of Drought in Seven Algerian Plains. *The Arabian Journal of Science and Engineering*, 39: 339-359. doi: 10.1007/s13369-013-0827-3
- Meddi M., 2015-** Contribution à l'étude du transport solide en Algérie du Nord. *Larhyss journal*, (24), 315-336.
- Mehaiguene M., Meddi M., Longobardi A. and Toumi S., 2013-** Low flows quantification regionalization in North West Algeria. *Journal of Arid Environments*. V. 87. 67-76. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2012.07.014>
- Merzouk A. and Black G.R., 1991-** Indices for the estimation for intervill erodibility of marrocan soils. *Catena*, 18, 537-550.
- Mhiri A., 1970-** *Etude de la stabilité structurale des horizons de surface de quelques sols du Nord de la Tunisie*. Thèse de doctorat de 3ème cycle. Faculté des sciences de paris. 70 p.
- Monnier G., 1965-** *Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols*. Thèse dedoct. ing. Fac. Sci. Paris, 140 p.
- Monnier G. et Stengel P., 1982-** La composition granulométrique des sols, un moyen de prévoir leur fertilité. *Bull. tech. D'inf. France*, 503-512.
- Morsli B., 1996-** *Caractérisation, distribution et susceptibilité à l'érosion des sols de montagne. Cas des Monts de Beni Chougrane-Mascara*. Thèse de Magister en Sciences agronomiques, INA d'Alger, 166 p.



- Morschel J. et Fox D., 2004-** Une méthode de cartographie du risque érosif : application aux collines du Terrefort Lauragais, *M@ppemonde*, (76). 11 p.
URL. <http://mappemonde.mgm.fr/num4/articles/art04404.pdf>
- Morsli B., Mededjel N., Hamoudi A. et Roose E., 2004-** Influences de l'utilisation des terres sur les risques de ruissellement et d'érosion sur les versants semi-arides du Nord-Ouest de l'Algérie. *Sécheresse*, vol. 15, (1), 96-104.
- Nahal L., 1984-** Problèmes de désertification en région méditerranéenne. *Départ. des Sci. des sols. INRA Paris-Grignon*, 14: 71-103.
- Poesen J., 1984-** The influence of slope angle on infiltration rate and Hortonian overland flow volume. *Z. Geomorphol. N.F.* 49, 117-131.
- Poesen J. and Hooke J.M., 1997-** Erosion flooding and channel management in Mediterranean Environments of Southern Europe. *Progress in physical Geography*, 21, 2: 157-199.
- Poss R., Pleuvret C. et Saragoni H., 1989-** Influence des réorganisations superficielles sur l'infiltration dans les terres de Barre (Togo méridional). *Cah. Orstom, Ser. Pédol.*, XXV (4), 405-415.
- Oduro-Afriye K., 1996-** Rainfall erosivity map for Ghana. *Geoderma* 74, 161-166.
- Rahhou M., 1999-** *L'érosion dans le Prérif central, zone interfluviale Leben-Sebou-Ouergha, un prolongement de l'évolution naturel, une production sociale.* Thèse d'Etat. Univ. Mohammed V, Rabat.
- Ramdani M., 1993-** Caractéristiquement lithologiques des bassins versants de barrages en liaison avec leur sensibilité à l'érosion. *ANRH- Rapport interne. Alger.*
- Rango A. et Arnoldus H.M.J., 1987-** Aménagement des bassins versants. *Cahiers techniques de la FAO* :1-11.
- Renard K.G. and Freimund J.R., 1994-** Using monthly precipitation data to estimate the R-faktor in the revised USLE. *Journal of Hydrology*, 157: 287-306.
- Remini B. et Bensafia D., 2016-** Envasement des barrages dans les régions arides exemples algériens. *Larhyss Journal*, (27), 63-90.
- Remy J.C. et Marin-Lafleche A., 1974-** L'analyse de terre : réalisation d'un programme d'interprétation automatique. *Annales Agronomiques*, 25. (4), 607- 632
- Rerboudj A.M., 2005-** *Essai de quantification de l'érosion et perspective de la protection du barrage de fontaine des gazelles contre l'envasement (approche numérique).* Memoire de Magister, Université de Batna. 130 p.
- Roose E., 1977-** Application of the Universal Soil Loss Equation of Wischmeier and Smith in West Africa, *Soil Conservation Society of America, Ankeny, Iowa*, 50-71.
- Roose E., 1984-** Causes et facteurs de l'érosion hydrique sous climat tropical, conséquences pour les méthodes antiérosives. *Machinisme Agric. Trop.* 87: 4-18.
- Roose E. et Sarrailh J.M., 1989-** Erodibilité de quelques sols tropicaux Vingt années de mesure en parcelles d'érosion sous pluies naturelles. *Cahier Orstom Pédologique*, 25(1): 7-30.
- Roose E., 1993-** Water and soil fertility management-A new approach tee fight erosion and improve land productivity, in Acceptance of soil and water conservation strategies and technologies. *DISTL, Witzenhausen, RCA*, 129-164.



- Roose E., 1994-** Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). *Bull. Pédol. FAO.*, 70, 420 p.
- Roose E., Chebbani R. et Bourougaa L., 2000-** Ravinement en Algérie, Typologie, facteurs de contrôle, quantification et réhabilitation. *Bull. Réseau-Erosion (19)*, Ed. IRD, Montpellier, 122-138.
- Roose E., 2004-** Exemple de GCES en moyenne montagne méditerranéenne d'Algérie. *Synthèse secheresse* V 15 (1, 9, 18). 54-66.
- Roose E., Sabir M., Arabi M., Morsli B. et Mazour M., 2012-** Soixante années de recherches en coopération sur l'érosion hydrique et la lutte antiérosive au Maghreb. *Physio-Géo (6)*: 43-69.
- Sadiki A., Bouhlassa S., Auajjar J., Faleh A. et Macaires J.J., 2004-** Utilisation d'un SIG pour l'évaluation et la cartographie des risques d'érosion par l'Equation universelle des pertes en sol dans le Rif oriental (Maroc) : cas du bassin versant de l'oued Boussouab, *Bulletin de l'Institut Scientifique*, Rabat, section Sciences de la Terre, (26), 69-79.
- Sadiki A., 2005-** *Estimation des taux d'érosion et de l'état de dégradation des sols dans le bassin versant de l'oued Boussouab, Maroc Nord oriental : application du modèle empirique (USLE), de la technique du radio-isotope ¹³⁷Cs et de la susceptibilité magnétique.* Thèse doctorat d'Etat. Université Mohamed V, Oujda, 320 p.
- Seed H.B., Woodward R.J. and Lundgren R., 1962-** Prediction of swelling potential for compacted clays: *J. ASCE, Soil Mechanics and Foundation Division, Vol. 88, No. SM-3, Part I*, 53-87.
- Seltzer P., 1946-** Le climat de l'Algérie. *Inst. Météor. Et Phys. Du Globe*. Univ. Alger. 219 p.
- Smahi E.J., 2001-** *Etude du phénomène d'ensablement sur le plateau de Mostaganem et propositions d'aménagement.* Thèse de Magister en géographie physique. Université d'Oran Es-Senia. 164 p + cartes.
- Souadi Y., 2011-** *L'érosion hydrique au Maghreb étude d'un cas : le bassin versant de l'Oued Barbara (Tunisie septentrionale).* Mémoire d'étude, Université du Québec à Montréal, 130 p.
- Soutter M., Mermoud A. et Musy A., 2007-** *Ingénierie des eaux et du sol. Processus et aménagements.* Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, 312 p. (ISBN 978-2-88074-724-4).
- Stewart PH., 1969 -** Quotient pluviométrique et dégradation biosphérique : quelques réflexions. *Bull. Soc. Hist. Nat. Afr. Nord.* Alger (59) : 23-26.
- Tardy Y., 1969-** *Géochimie des altérations. Etude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique.* Thèse Sci. Strasbourg. Mim. Serv. Carte Géol. Lorr, 31, 199 p.
- Tinthoin R., 1948-** Les aspects physiques du Tell oranais. *Ed. I. Fouque, Oran*, 589 p + Annexes.
- Tribak A., El Garouani A. et Abahrour M., 2009-** Evaluation quantitative de l'érosion hydrique sur les terrains marneux du Pré Rif oriental (Maroc): Cas du Sous-bassin d'oued Tlala. *Sécheresse(20) (4)*: 333-337.
- Topper E., Molien A. et Kuypers H., 1985-** La défense des sols contre l'érosion sous les tropiques. *Agrodok-series (11)*. 61 p + annexes.
- Touaibia B. Dautrebande S., Gomer D. et Aidaoui A., 1999-** Approche quantitative de l'érosion hydrique à différentes échelles spatiales : bassin versant de l'Oued Mina. *J. Sciences Hydrologiques.*, 44, 6. : IAHS Press. Wallingford. UK : 973- 986.
- Touaibia B., 2000-** *Erosion transport solide-ensablement de barrages. Cas du bassin versant de l'oued Mina.* Thèse de Doctorat d'Etat, INA, El-Harrach, Algérie, 170 p.



- Touaibia B., Gomer D. et Aidaoui A., 2000-** Estimation de l'index d'érosion de Wischmeier dans les micro-bassins expérimentaux de l'oued Mina en Algérie du Nord. *Bull. Réseau Erosion* (20), Ed., IRD, Montpellier, 478-484.
- Touaibia B. et Achite M., 2003-** Contribution à la cartographie de l'érosion spécifique du bassin versant de l'Oued Mina en zone semi-aride de l'Algérie septentrionale. *Hydrological Sciences Journal*. 48(2), 235-242.
- Toumi S., 2013-** *Application des techniques nucléaires et de la télédétection à l'étude de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'oued mina*. Thèse de doctorat es-sciences de l'école nationale supérieure d'hydraulique. 175 p.
- Toumi S., Meddi M., Mahé G. et Brou Y.T., 2013-** Cartographie de l'érosion dans le bassin versant de l'Oued Mina en Algérie par télédétection et Sig. *Hydrol. Sci. J.* 58(7), 1542-1558.<http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2013.824088>
- Vita-Finzi C., 1969-** The Mediterranean Valleys. *Cambridge University Press*, 140 p.
- Vrieling A., Sterk G. et De Jong S.M., 2010-** Satellite-based estimation of rainfall erosivity for Africa. *Journal of Hydrology*, 395: 235-241.
- Wakim J., 2005-** *Influence des solutions aqueuses sur le comportement mécanique des roches argileuses*. Thèse doctorat de l'école nationale supérieure des mines de Paris, France, 154 p.
- Wang G., Wentz S., Gertner G. Z. et Anderson A., 2002-** Improvement in mapping vegetation cover factor for the universal soil loss equation by geostatistical methods with Landsat thematic mapper images. *Int. J. Remote Sens* 23(18), 649-3667.
- Wischmeier W.H. and Smith D.D., 1962-** Rainfall erosion. *Advances in Agronomy* 14, 109-148.
- Wischmeier W.H., Johnson C. B. and Cross B.V., 1971-** A soil erodibility monograph for farm land and construction sites. *J. of soil and water*. Vol. 2, 265 p.
- Wischmeier W. H., 1975-** New developments in estimating water erosion. Reprint. of the 29 th. Annual meeting of the SSS of America. August 1974, *Syracuse, New York*. 179-195.
- Wischmeier W.H. and Smith D.D., 1978-** Predicting rainfall erosion. A guide to conservation planning. *USDA-ARS, Agriculture andbook*, (537), 58 p.

ANNEXES

Tableau A : Description des échantillons dans les deux zones test

Echantillons	Description	Coordonnées géographiques
Marnes vert-clair	Exposition : Ouest Géomorphologie : Versant Aspect de surface : marne affleurant Erosion : Ravinements Végétation : faible recouvrement Roche mère : marne	0° 08' 54" E 36° 02' 01" N
Marnes bleues	Exposition : Nord-Ouest Géomorphologie : Versant Aspect de surface : marne affleurant Erosion : Ravines et ravins Végétation : faible recouvrement Roche mère : marne	0° 39' 32,42" E 35° 29' 30,84" N
Marnes jaunâtre-vert-clair	Exposition : Nord-Ouest Géomorphologie : Versant Aspect de surface : marne affleurant Erosion : ravines et ravins Végétation : faible recouvrement forestière Roche mère : marne	0° 08' 55" E 36° 02' 03" N
Sols bruns vertiques sur marnes	Exposition : Nord Géomorphologie : replat (aval du versant) Aspect de surface : croûte structurale, fente de retrait, galet arrondis Erosion : nappe Végétation : sans végétation Roche mère : marne Description morphologique : A de 0- 20 cm : texture argileuse, structure grenue, matière organique directement décelable, quelques racines très fines, vive effervescence à l'Hcl, présence de fentes de retrait très peu graveleux, poreux, friable, transition nette	0° 42' 14,04" E 35° 33' 49,32" N
Sols peu évolués d'apport alluvial	Exposition : Nord-Ouest Géomorphologie : terrasse alluviale (2 – 5 %) Aspect de surface : charge caillouteuse, reste de culture Erosion : sapement des berges Végétation : Maraîchage Roche mère : marne Description morphologique : A de 0 – 20 cm : texture limoneuse, structure polyédrique, matière organique directement décelable, effervescence à l'Hcl présence de fente de retrait, calcaire sous forme diffuse, quelques racines, quelques éléments grossiers arrondis, peu compacte, peu poreux, transition nette	0° 40' 54,12" E 35° 29' 52,44" N
Marnes grises	Exposition : exposition Sud Géomorphologie : versant Aspect de surface : marne effleurant Erosion : la majorité des zones à lithologie marnes grises située dans une zone vénérable à l'érosion en nappe (risque considérable) Végétation : nu Roche mère : marne	0° 40' 05,52" E 35° 30' 48,24" N
Marnes brunes	Exposition : est la majeure partie se trouve dans les versant à exposition est de l'oued Abed Aspect de surface : marne effleurant Erosion : nappe et ravine Végétation : nu Roche mère : marne	0° 36' 33,12" E 35° 28' 50,88" N
Marnes vert-clair armés de grès	Exposition : Sud à Sud-Ouest Géomorphologie : versant Aspect de surface : marne effleurant Erosion :	0° 33' 49,32" E 35° 30' 15,32" N

	Végétation : nu Roche mère : marne	
Marnes bleues compactes et calcaires	Exposition : Nord Géomorphologie : Versant Erosion : en nappe et en ravine Végétation : nu Roche mère : marne	0° 39' 32,41" E 35° 29' 30,84" N
Marnes brunes armées de calcaire	Exposition : Nord Géomorphologie : Versant Aspect de surface : Cailloux, graviers calcaire et fentes de retrait Erosion : Ravine Végétation : céréaliculture Roche mère : marne Description morphologique : Horizon de 0 à 45 cm : texture argileuse, structure grumeleuse, peu de racines fines à grosses, vive effervescence à l'Hcl, graviers calcaires, présence de fentes de retrait, friable, poreux transition nette et régulière	0° 39'54,36" E 35° 28'13,08" N
Sols calcaires et marnes	Exposition : Nord Géomorphologie : versant 20 % Aspect de surface : quelques galets arrondis (2 à 5 %), fentes de retrait Erosion : nappes et rigoles Végétation : céréale, reste de canopée Roche mère : marne Description morphologique : Horizon de 0 à 45 cm : texture argileuse, structure polyédrique, débris organique, quelques racines, vive effervescence à l'Hcl, bonne activité biologique, calcaire sous forme diffuse, quelques cailloux présence de fentes de retraits, poreux, friables, transition nette.	0° 32'13,92" E 35° 25'36,48" N

Tableau B : Valeurs du facteur d'érosivité des pluies R des stations météorologiques de la partie occidentale du bassin versant d'Oued Mina

Staions	X (km)	Y (km)	Z (m)	R
Sidi M'hamed Ben Aouda	308,85	255,18	145	41,18
Sidi A.E.K Djilali	309,00	244,50	225	41,59
Oued El Abtal	318,05	261,70	345	58,10
Djilali Benamar	232,50	239,90	300	77,29
Mechra safa	351,00	233,20	655	84,81
Ain Hamara	316,45	233,12	288	42,42
Kef-Mahboula	331,60	224,25	475	69,13
Takmaret	316,40	203,10	655	39,18
El Hachem	299,50	233,10	417	61,75
Aouf	287,15	211,08	990	74,52

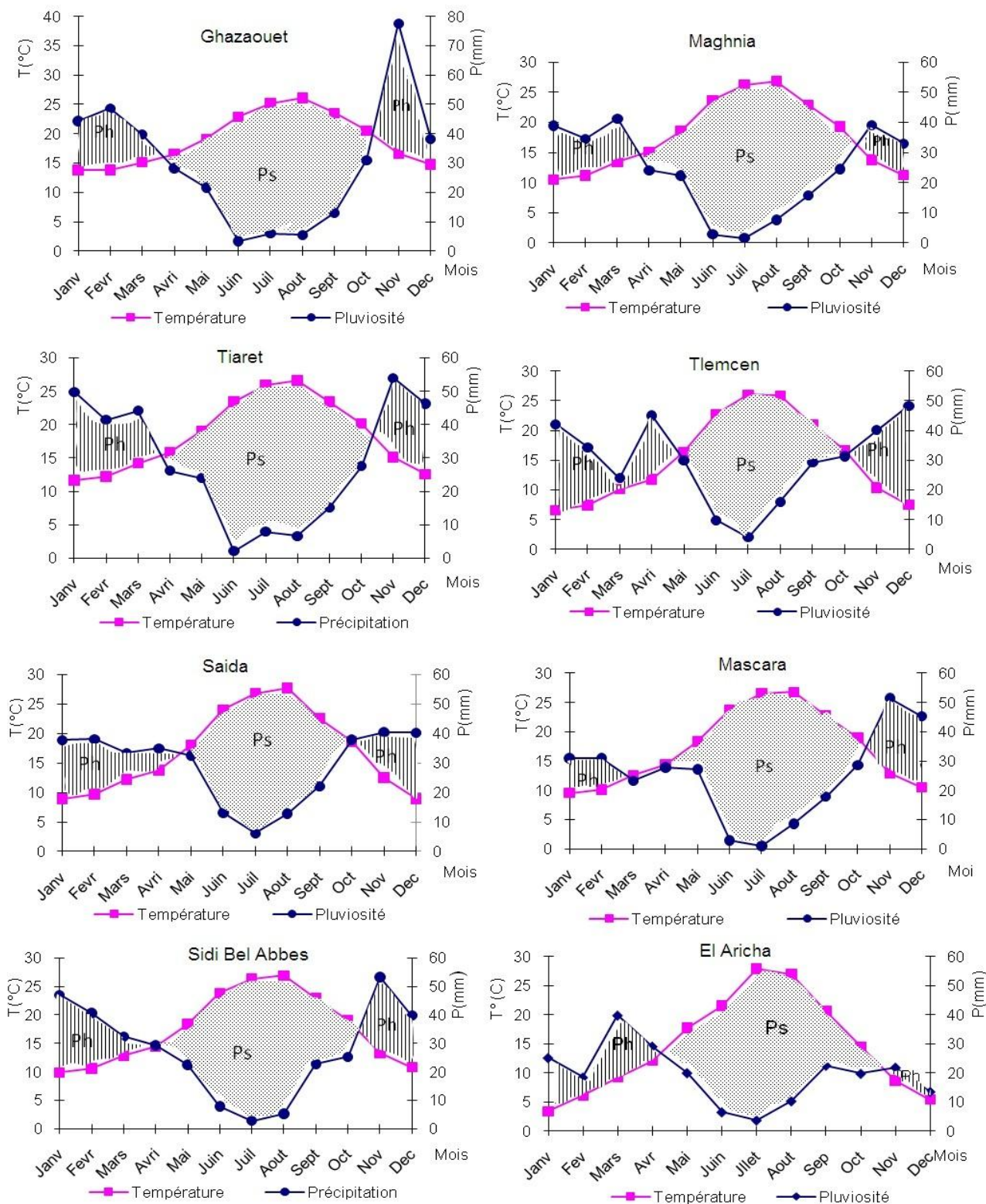


Figure A : Diagramme Ombrothermique de quelques stations du Tell oranais

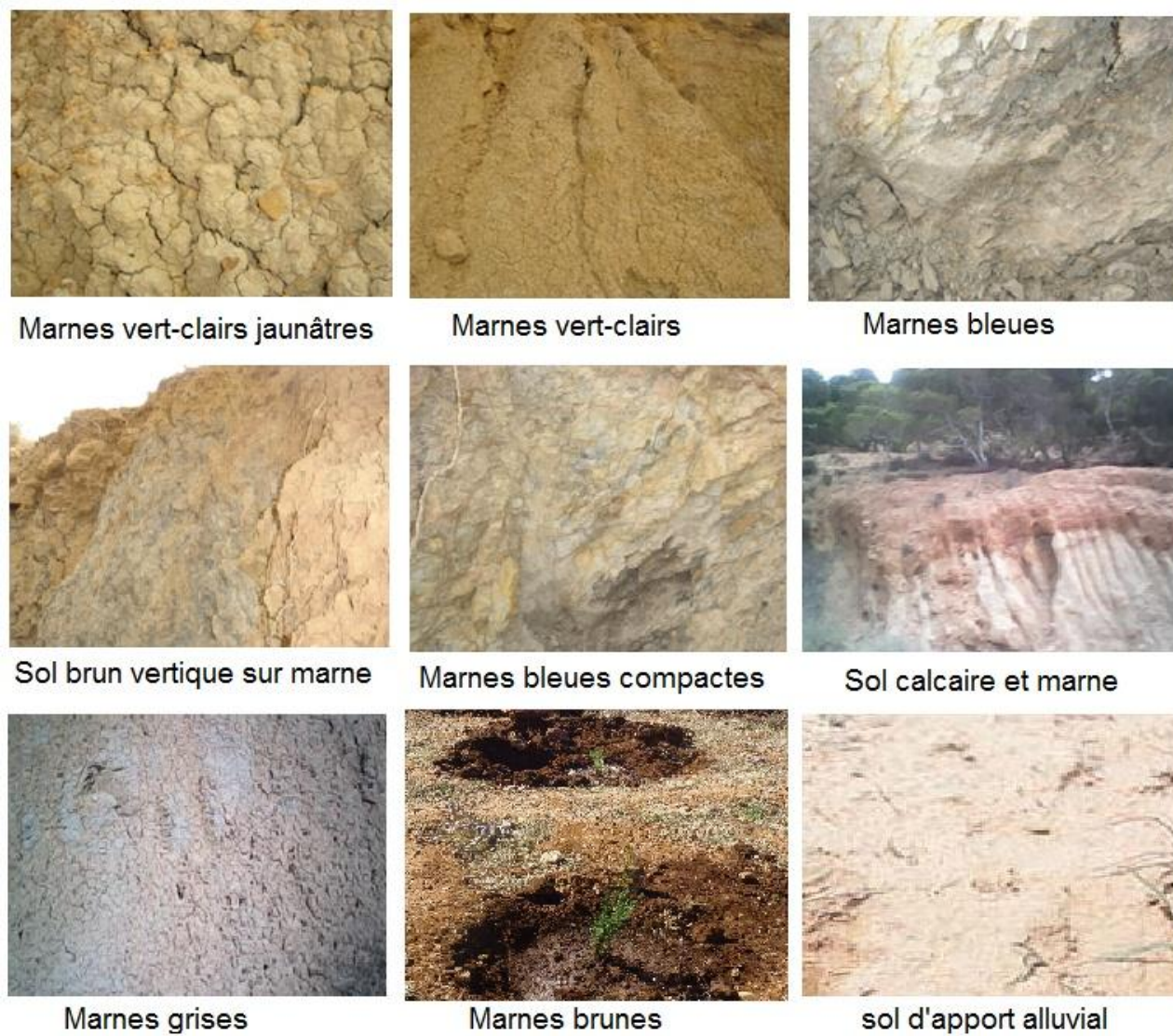


Figure B : Quelques types de marnes dans les deux zones test

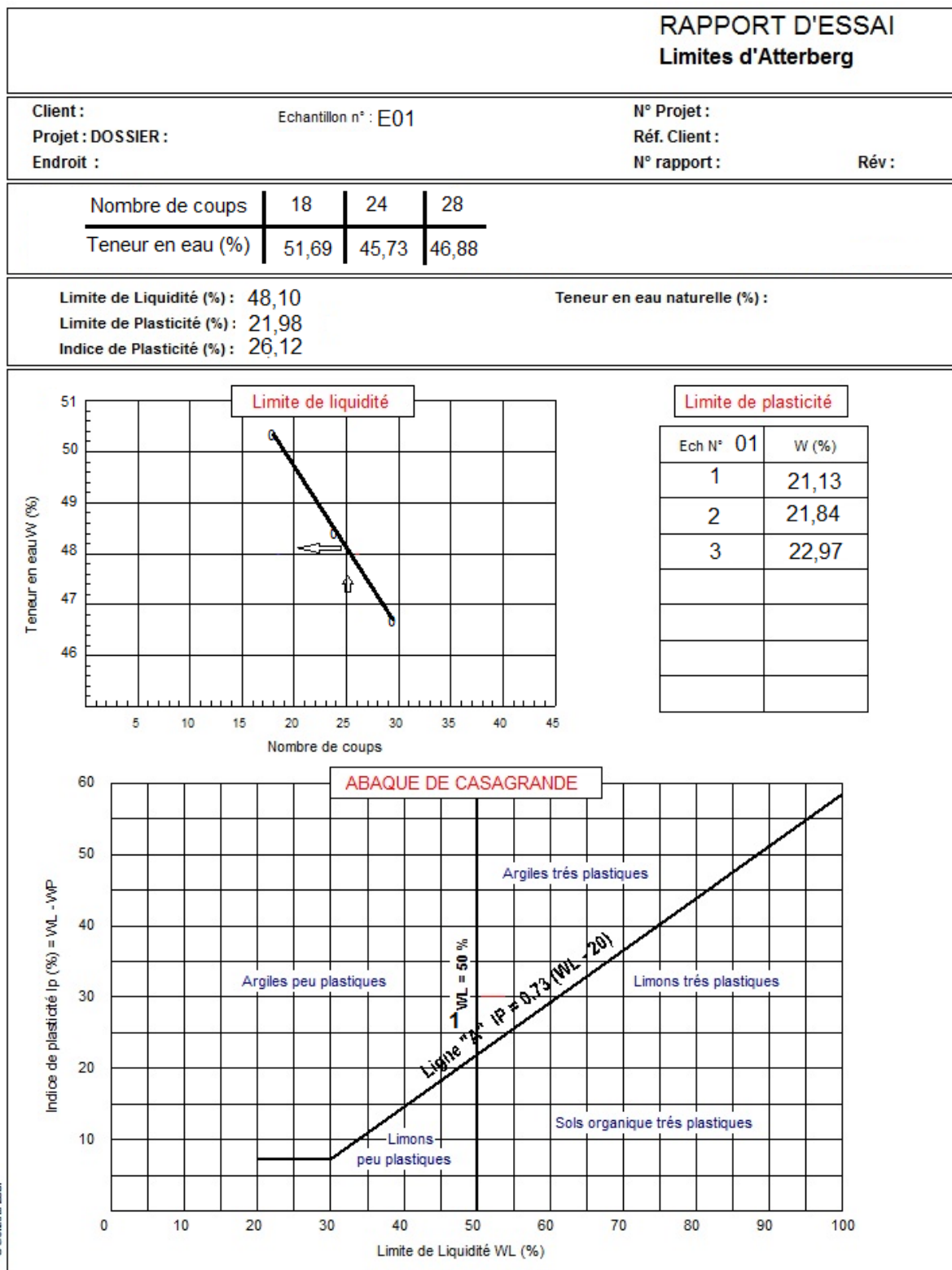


Figure C : Rapport d'essai de limites d'Atterberg de marnes vert-clair

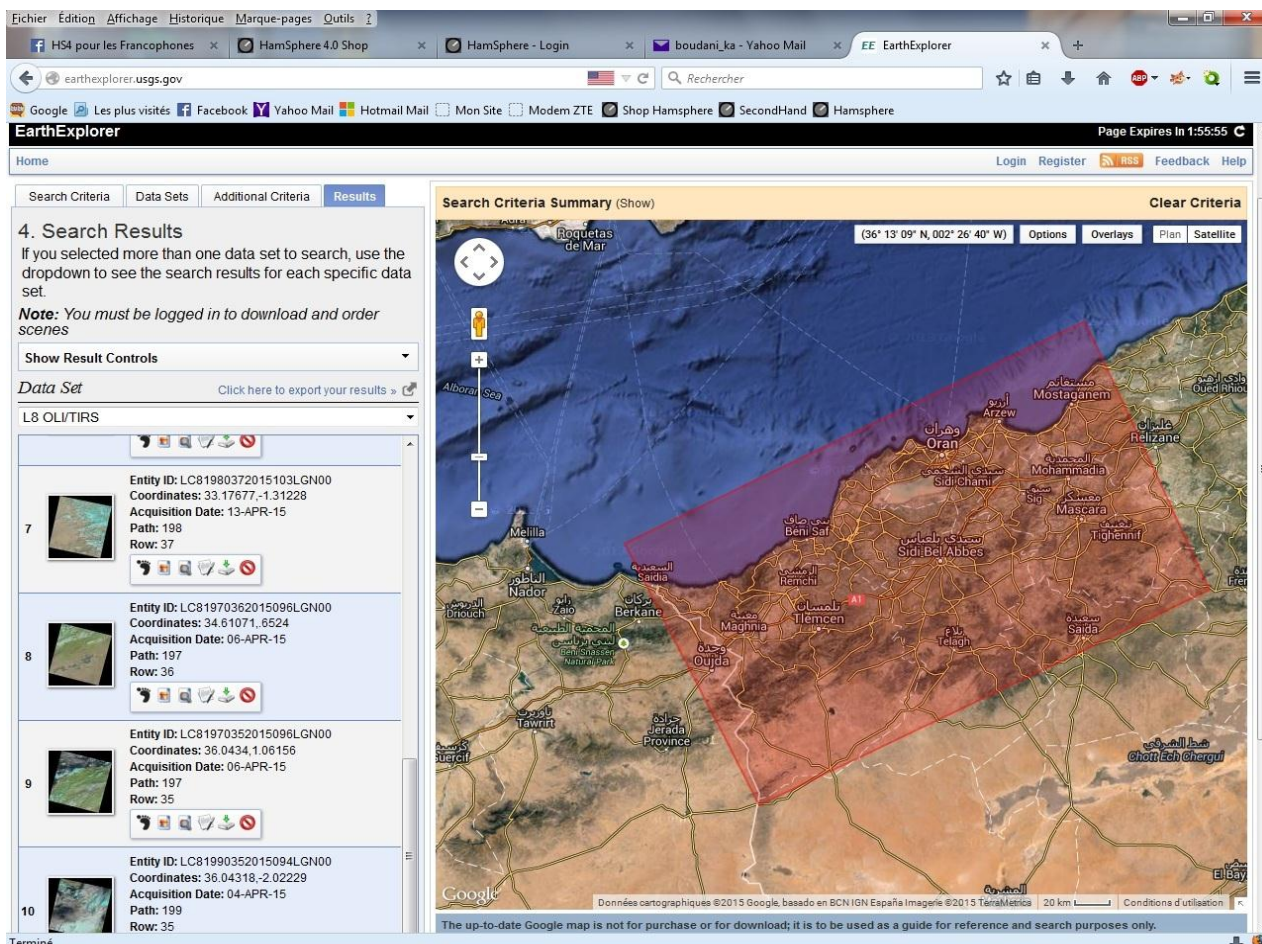


Figure D : Téléchargement des images satellites par le biais de site earth explorer USGS

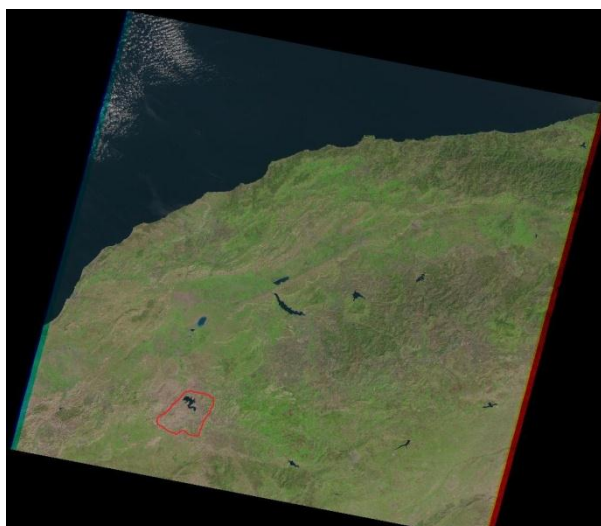


Figure E : Image satellite 197-35 de l'est du Tell oranais

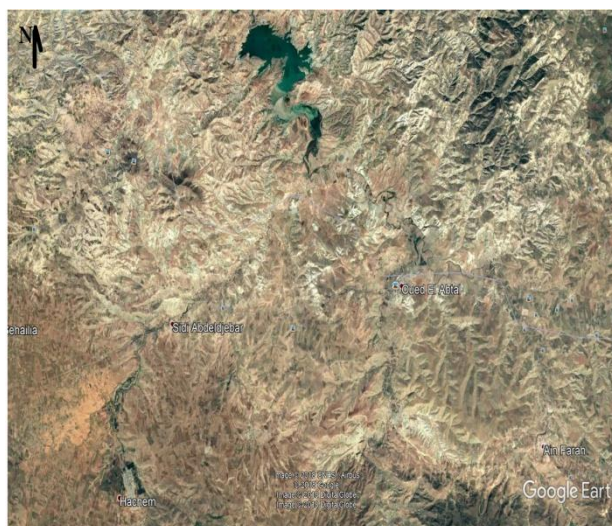


Figure F : Vue globale de la partie occidentale du bassin versant d'Oued Mina

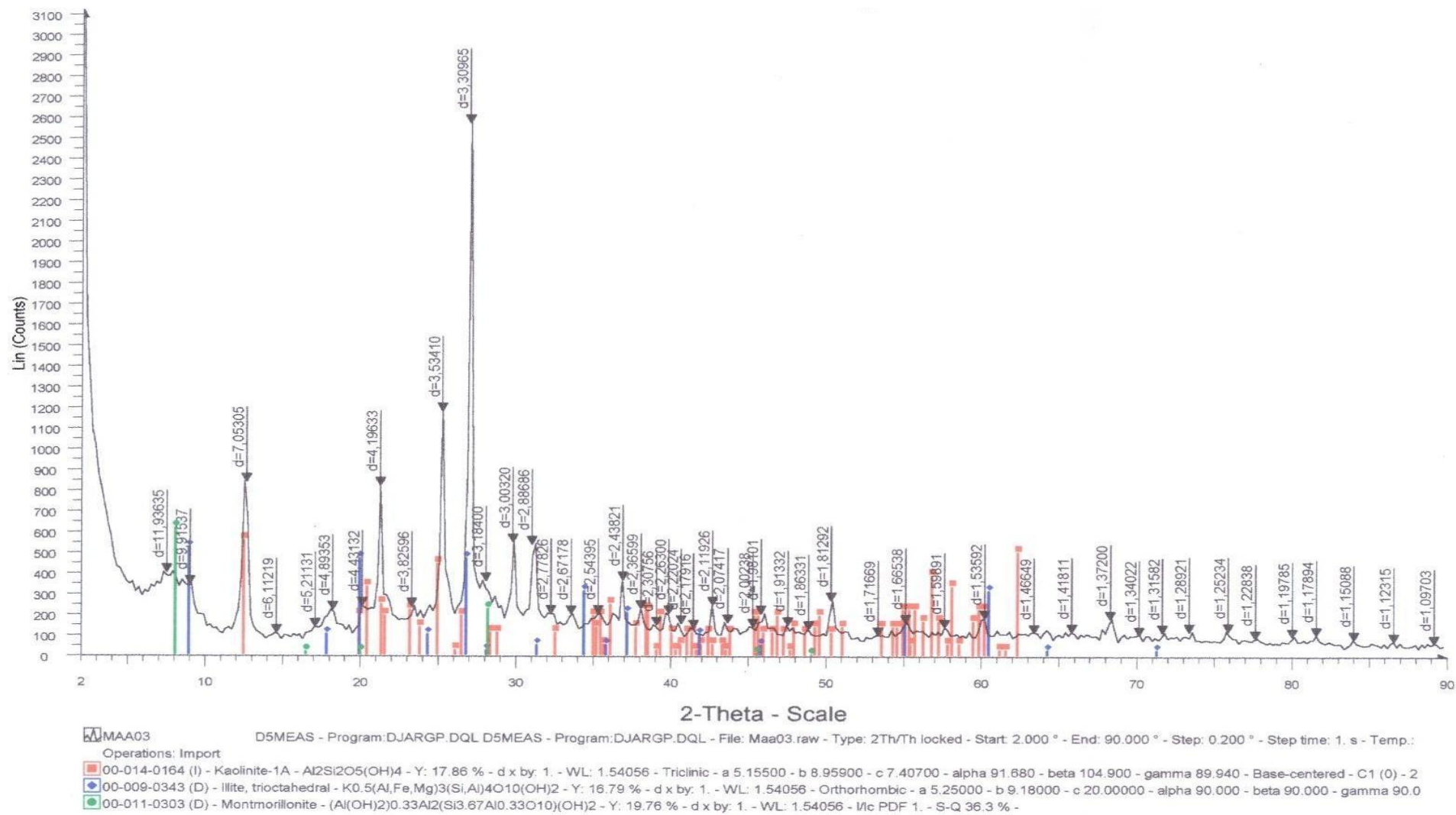


Figure G : Diagramme DRX des minéraux argileux dans les marnes vert-clair

