

REPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة باجي مختار – عنابة

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA



FACULTÉ DES SCIENCES

DÉPARTEMENT DE BIOLOGIE

LABORATOIRE DE RECHERCHE SOL ET DEVELOPEMENT DURABLE

THESE

EN VUE DE L'OBTENTION D'UN DIPLOME DE DOCTORAT

Filière : ECOLOGIE ET ENVIRONNEMENT

Spécialité : FONCTIONNEMENT DES ECOSYSTEMES

**Analyse spatiale et prévision de la dégradation des sols :
application aux bassins versants de la région de Hammam
N'Bails, Nord-Est algérien.**

Présenté par : OTHMANI OUAFIA

Devant le jury :

Président	BENSLAMA Mohamed	Professeur, Université d'Annaba
Directeur de thèse	KHANCHOUK Kamel	Professeur, Université d'Annaba
Co-directeur de thèse	BOUGUERRA Hamza	M.C.A, Université d'Annaba
Examineur	BOUAMRANE Ali	M.C.A, Université de Souk-Ahras
Examineur	KRAIMAT Mohamed	M.C.A, Université de Ghardaia

Année universitaire : 2024/2025

Résumé

L'érosion des sols est devenue un défi mondial qui menace l'agriculture et les ressources naturelles, en particulier dans les pays en voie de développement comme l'Algérie. Pour mettre en œuvre efficacement des mesures de conservation des sols, il est essentiel d'estimer la perte en sol et d'identifier les zones sujettes à l'érosion. Cette étude a été menée dans trois sous-bassins versants de la région de Hammam N'Bails, Nord-Est Algérien, dans le but d'estimer le facteur de l'érodibilité, les pertes et les transports annuels moyens des sols, et de déterminer les risques d'érosion hydrique afin que des mesures de conservation puissent être planifiées et mises en œuvre. Une étude préliminaire a été menée pour déterminer les paramètres physicochimiques permettant de calculer le facteur d'érodibilité du sol. En outre, les données morphométriques ont été examinées afin de mieux comprendre les propriétés physiques des sous-bassins versants. Ces informations sont essentielles pour déterminer l'impact sur la dynamique de l'érosion et la production de sédiments. La troisième étape consistait à la modélisation de l'érosion par le biais de la méthode RUSLE en vue d'estimer les pertes en sol. Les caractéristiques du modèle RUSLE ont été examinées dans ArcGIS 10.4 à l'aide de données sur les types de sol, les précipitations, la pente et l'occupation du sol provenant de différentes sources. Pour évaluer les pertes en sol pour les trois sous-bassins versants, on a multiplié les paramètres d'entrée à l'aide d'une calculatrice raster sous ArcGis. Également, il a question de créer des cartes de sensibilité à l'érosion dans un environnement SIG. Ces cartes ont été élaborées en croisant les cartes de lithologie, de pente, d'occupation du sol et le facteur d'érodabilité (K). Cette approche qualitative a permis d'identifier les zones à risque d'érosion et d'orienter les efforts de gestion et de conservation des sols. Ensuite, l'estimation de la dégradation spécifique au niveau de l'exutoire de chaque sous-bassin a été faite en combinant les résultats des deux modèles : pertes en sol par « RUSLE » et SDR (taux de délivrance de sédiments), ce qui a permis de quantifier le transport solide en suspension. L'analyse morphométrique a révélé que les sous-bassins sont sujets à une érosion accrue en raison d'une forte densité de drainage et talwegs et d'un relief assez jeune, à l'exception du sous-bassin de l'Oued Melah. Des variations significatives du facteur d'érodabilité (K) sont observés dans les sous-bassins étudiés, à savoir 0,03 pour l'Oued Rhirane, 0,05 pour l'Oued Melah et 0,06 pour l'Oued Bouzerag. Ces résultats indiquent une érodibilité modérée sauf pour les valeurs équivalentes à 0,06. La modélisation de l'érosion par la méthode RUSLE a donné des pertes en sol moyennes supérieures au seuil de tolérance (7t/ha/an). Les oueds Melah et Rhirane se distinguent par des valeurs élevées,

supérieures à 9 t/ha/an. Les taux d'érosion les plus élevés se localisent principalement sur les sols qui présentent des valeurs élevées de l'érodibilité et sur des sols qui comportent des cultures aux pratiques inappropriées sur des pentes raides. Entre autres, le sous-bassin de l'Oued Melah présente la dégradation spécifique la plus forte, avec 11 t/ha/an, alors que pour les deux autres sous-bassins ont des valeurs presque similaires (8,17 et 8,20 t/ha/an). En utilisant le test statistique de comparaison, on a constaté que chaque méthode utilisée pour le calcul de l'érodibilité du sol et les pertes en sol (RUSLE) ont fourni des estimations semblables entre les bassins avec un seuil de confiance de 95% ; cependant, une discordance est observable au niveau des transports solide spécifiques. L'ensemble des méthodes utilisées ont permis de donner un aperçu global du phénomène de l'érosion qui permettra aux décideurs d'envisager ou d'entreprendre des mesures anti-érosives et de restauration des sols. Les recommandations ont été élaborées pour chaque sous-bassin, notamment en ce qui concerne la stabilisation des pentes, l'augmentation du couvert végétal et la création de bandes tampons végétales.

Mots-clés : Bassin versant, K-USLE, RUSLE, Transport solide, Erosion des sols.

Abstract

Soil erosion has become a global challenge that threatens agriculture and natural resources, particularly in developing countries like Algeria. To effectively implement soil conservation measures, it is essential to estimate soil loss and identify areas prone to erosion. This study was carried out in three subwatersheds of the region of Hammam N'Bails, North-East Algeria, with the aim of estimating the erodibility factor, soil losses and average annual sediment transport, and determine water erosion risks so that conservation measures can be planned and implemented. A preliminary study was carried out to determine the physicochemical parameters allowing the calculation of the soil erodibility factor. Additionally, morphometric data were examined to better understand the physical properties of the subwatersheds. This information is essential to determine the impact on erosion dynamics and sediment production. The third step consisted of erosion modeling using the RUSLE method in order to estimate soil losses. The characteristics of the RUSLE model were examined in ArcGIS 10.4 using soil types, precipitation, slope, and land cover data from different sources. To evaluate soil losses for the three subwatersheds, we multiplied the input parameters using a raster calculator under ArcGis. Also, there was the question of creating erosion sensitivity maps in a GIS environment. These maps were developed by crossing maps of lithology, slope, land use and the erodibility factor (K). This qualitative approach was followed to identify areas at risk of erosion and to guide soil management and conservation efforts. Then, the estimation of the sediment yield at the outlet of each sub-basin was made by combining the results of the two models: soil losses by "RUSLE" and SDR (sediment delivery rate), which has provided a possibility to quantify sediment yield in suspension. The morphometric analysis revealed that the sub-basins are subject to increased erosion due to a high density of drainage and thalwegs and a fairly young relief, with the exception of the Oued Melah sub-basin. Significant variations in the erodibility factor (K) are observed in the study sub-basins, namely 0.03 for Wadi Rhirane, 0.05 for Wadi Melah and 0.06 for Wadi Bouzerag. These results indicate moderate erodibility except for values equivalent to 0.06. Erosion modeling using the RUSLE method gave average soil losses above the tolerance threshold (over 7t/ha/year). The Melah and Rhirane wadis stand out for their high values, greater than 9 t/ha/year. The highest erosion rates are mainly located on soils that have high erodibility values and on soils that include crops with inappropriate practices on steep slopes. Among others, the Wadi Melah sub-basin presents the strongest sediment yield, with 11 t/ha/year, while the other two sub-basins have almost similar values (8.17 and 8.20 t/ha/year). Using the

statistical comparison test, it was found that each method used for calculating soil erodibility and soil losses (RUSLE) provided similar estimates between basins with a confidence level of 95%; however, a discrepancy is seen at the sediment yield values. All the used methods can provide a global overview of the erosion phenomenon which allow the deciders to consider or undertake anti-erosion and soil restoration measures. The recommendations were developed for each sub-basin, particularly with regard to slope stabilization, increasing plant cover and creating plant buffer strips.

Keywords: Watershed, K-USLE, RUSLE, Sediment transport, Soil erosion.

ملخص

لقد أصبح تآكل التربة تحدياً عالمياً يهدد الزراعة والموارد الطبيعية، لا سيما في البلدان النامية مثل الجزائر. ولتنفيذ تدابير الحفاظ على التربة بفعالية، من الضروري تقدير فقدان التربة وتحديد المناطق المعرضة للتعرية. تم إجراء هذه الدراسة في ثلاثة أحواض مائية في منطقة حمام النبائل شمال شرق الجزائر بهدف تقدير عامل التعرية ومتوسط الفقد السنوي للتربة وانتقالها وتحديد مخاطر التعرية المائية حتى يمكن تخطيط وتنفيذ تدابير الحفاظ. تم إجراء دراسة أولية لتحديد البارامترات الفيزيائية والكيميائية لحساب عامل تآكل التربة. وبالإضافة إلى ذلك، تم فحص البيانات المورفومترية للحصول على فهم أفضل للخصائص الفيزيائية للأحواض المائية. هذه المعلومات ضرورية لتحديد التأثير على ديناميكيات التعرية وإنتاج الرواسب. تضمنت المرحلة الثالثة نمذجة التآكل باستخدام نموذج التآكل باستخدام RUSLE لتقدير خسائر التربة. خصائص النموذج RUSLE تم فحصها في ArcGIS باستخدام بيانات عن نوع التربة وهطول الأمطار والانحدار والغطاء الأرضي من مصادر مختلفة. لتقييم خسائر التربة للأحواض المائية الثلاثة، تم ضرب معلمات المدخلات باستخدام آلة حاسبة راستر تحت ArcGIS. كما تضمن المشروع أيضاً إنشاء خرائط لحساسية التآكل في بيئة SIG. رُسمت هذه الخرائط من خلال الإحالة المرجعية إلى خرائط علم طبقات الأرض الصخرية والانحدار واستخدام الأراضي وعوامل التعرية (K). مكن هذا النهج النوعي من تحديد المناطق المعرضة لخطر التآكل وتوجيه جهود إدارة التربة والحفاظ عليها. بعد ذلك، تم تقدير التدهور النوعي عند مخرج كل حوض فرعي من خلال الجمع بين نتائج النموذجين: فقدان التربة عن طريق RUSLE و SDR (معدل توصيل الرواسب)، مما جعل من الممكن تحديد كمية انتقال المواد الصلبة العالقة. كشف التحليل المورفومتري أن الأحواض المائية معرضة لتآكل متزايد بسبب الكثافة العالية للصرف ومجري الأودية والتضاريس الصغيرة إلى حد ما، باستثناء حوض وادي مالح الفرعي. اختلافات كبيرة في عامل قابلية التعرية (K) لوحظت في الأحواض الفرعية المدروسة، وهي 0.03 لوادي ريران، و 0.05 لوادي مالح و 0.06 لوادي بوزراق. تشير هذه النتائج إلى قابلية تآكل معتدلة، باستثناء القيم التي تعادل 0.06. نمذجة التآكل باستخدام RUSLE أعطى متوسط خسائر التربة فوق عتبة التحمل (7 طن/هكتار/سنة). يتميز وادي مالح وريران بقيم عالية، أعلى من (9 طن/هكتار/سنة). توجد أعلى معدلات التآكل بشكل رئيسي في التربة ذات القيم العالية للتعرية وفي التربة ذات الممارسات الزراعية غير المناسبة على المنحدرات الحادة. ومن بين الأحواض المائية الأخرى، فإن حوض وادي مالح الفرعي لديه أعلى معدل تدهور (11 طن/هكتار/سنة)، في حين أن القيم بالنسبة للحوضين الفرعيين الآخرين هي قيم متشابهة تقريباً (8,17 و 8,20 طن/هكتار/سنة). وباستخدام اختبار المقارنة الإحصائية، وجد أن كل طريقة مستخدمة لحساب تآكل التربة وخسائر التربة RUSLE قدمت تقديرات متشابهة بين الأحواض بمستوى ثقة 95 بالمئة. ومع ذلك، يمكن ملاحظة وجود تباين من حيث النقل الصلب المحدد. توفر الطرق المستخدمة مجتمعة نظرة عامة على ظاهرة التآكل التي ستمكن صانعي القرار من النظر في تدابير مكافحة التآكل واستعادة التربة أو اتخاذ تدابير مكافحة التآكل واستعادة التربة. وقد تم وضع توصيات لكل حوض فرعي، لا سيما فيما يتعلق بتثبيت المنحدرات وزيادة الغطاء النباتي وإنشاء شرائط عازلة مزروعة.

الكلمات المفتاحية: حوض مائي، RUSLE، K-USLE، النقل الصلب، تآكل التربة.

Dédicaces

*C'est avec une gratitude sincère et une considération chaleureuse
que je dédie cette thèse*

A mes chers parents

A mes chers frères

A ma chère nièce Lina Malak

A mes neveux Mohamed - Chiheb - Nizar - Youssef

A tous ceux qui me sont chers

A Walid

Remerciements

Je souhaite tout d'abord exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de thèse, Professeur **KHANCHOUL Kamel**. Tout au long de ces années de recherche, il m'a offert bien plus que son expertise scientifique : il m'a accordé un soutien inconditionnel, prodigué des conseils avisés et manifesté une bienveillance exemplaire. Sa rigueur intellectuelle, son exigence envers la qualité scientifique, son enthousiasme constant, ainsi que sa patience et son suivi attentif, ont été pour moi des sources d'inspiration et de motivation. J'ai également bénéficié d'une autonomie précieuse dans mes choix scientifiques, ce qui a grandement contribué à mon développement personnel et académique. Je le remercie sincèrement pour la qualité de son encadrement, tant sur le plan scientifique qu'humain. Plus qu'un simple encadrant, il a été un véritable mentor et un modèle de persévérance et de passion pour la recherche.

Je tiens à remercier chaleureusement Professeur **BENSLAMA Mohamed**, directeur du laboratoire **Sols et Développement Durable**, qui m'a accueilli dans son laboratoire et a permis à cette thèse de se dérouler dans les meilleures conditions. Je le remercie pour sa patience et sa disponibilité inestimable, surtout dans les moments les plus complexes. Grâce à lui, j'ai pu affiner ma méthodologie et m'épanouir intellectuellement, ce qui m'a permis d'acquérir une indépendance scientifique. Ses encouragements m'ont donné confiance et m'ont permis de surmonter les obstacles rencontrés tout au long de cette thèse.

Je souhaite également exprimer ma reconnaissance envers **BOUGUERRA Hamza** mon co-directeur de thèse, pour avoir accepté la codirection de cette thèse, pour son appui et son aide qui ont apporté un regard complémentaire qui a enrichi mon travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à **BELGHIT Meriem**, ingénieur au Laboratoire Sols et Développement Durable, pour son soutien indéfectible tout au long de mon travail. Son expertise, sa disponibilité et ses précieux conseils ont été essentiels à la réussite de ma thèse. Avec sa rigueur scientifique et sa générosité, elle m'a guidé dans les moments difficiles et a contribué de manière significative à l'aboutissement de mes recherches.

Je tiens à remercier sincèrement **tous les membres du jury**, pour le temps qu'ils ont consacré à l'examen de mon travail. Leurs observations, conseils et remarques ont été

particulièrement enrichissants et m'ont permis d'approfondir ma réflexion. Leur expertise et leur regard critique ont contribué à l'enrichissement de cette thèse.

J'exprime mon infinie gratitude à **mes chers PARENTS** pour tout ce que vous avez fait pour moi. Votre soutien et vos encouragements constants ont été ma force tout au long de ce parcours. Vous m'avez incité à persévérer dans les moments difficiles, et ce travail est un témoignage de vos sacrifices et de votre foi en moi.

Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude à **mes chers FRERES** pour leur aide et leur soutien inestimables tout au long de la réalisation de cette thèse. Vos sacrifices, votre patience et votre dévouement, en particulier sur terrain dans des conditions parfois très difficiles. Votre présence et vos encouragements m'ont donné la force d'aller de l'avant, même dans les moments les plus difficiles. Ce travail est aussi le reflet de votre générosité et de votre solidarité. Je vous remercie du fond du cœur pour tout ce que vous avez fait pour moi.

Liste des tableaux

Tableau 1. Quotients pluviométriques des trois stations.	34
Tableau 2. Précipitation moyenne annuelles des trois stations pluviométriques.	36
Tableau 3. Variation annuelle des précipitations des trois stations pluviométriques.	37
Tableau 4. Variations mensuelles des précipitations des trois stations pluviométriques.	39
Tableau 5. Représentation du nombre d'années humides et sèches au niveau des trois stations.	41
Tableau 6. Variations mensuelles des températures des trois stations pluviométriques.	42
Tableau 7. Répartitions des formations lithologiques des sous-bassin versants.	46
Tableau 8. Répartitions des sols des sous-bassins versants.	50
Tableau 9. Répartition des classes de pentes des sous-bassin versants.	53
Tableau 10. Répartition de la végétation dans les sous-bassins étudiés.	59
Tableau 11. Les valeurs référence du Ph du sol.	65
Tableau 12. Les indices de sensibilité des cartes thématiques.	90
Tableau 13. Valeurs probables des indices de la carte du premier croisement (occupation du sol et pentes).	90
Tableau 14. Valeurs probables des indices de la carte du deuxième croisement (occupation du sol, pentes, lithologie).	91
Tableau 15. Valeurs probables des indices de la carte du troisième croisement (occupation du sol, pentes, lithologie et facteur K).	92
Tableau 16. Répartitions des classes du pH-H ₂ O du sous-bassin de l'Oued Rhirane.	98
Tableau 17. Répartitions des classes du pH-KCl du sous-bassin de l'Oued Rhirane.	98
Tableau 18. Répartition des classes du pH-H ₂ O du sous-bassin de l'Oued Melah.	99
Tableau 19. Répartition des classes du pH-KCl du sous-bassin de l'Oued Melah.	99
Tableau 20. Répartition des classes du pH-H ₂ O de l'Oued Bouzerag.	101
Tableau 21. Répartition des classes du pH-KCl du sous-bassin versant de l'Oued Bouzerag.	101
Tableau 22. Résultats de l'analyses de la conductivité électrique de l'Oued Rhirane.	102
Tableau 23. Résultats de l'analyses de la conductivité électrique du sous-bassin de l'Oued Melah.	103
Tableau 24. Résultats de l'analyses de la conductivité électrique du sous-bassin de l'Oued Bouzerag.	105
Tableau 25. Statistiques descriptives des paramètres du sol du sous-bassin versant de l'Oued Rhirane.	106
Tableau 26. Statistiques descriptives des paramètres du sol du sous-bassin versant de l'Oued Melah.	109
Tableau 27. Statistiques descriptives des paramètres du sol du sous-bassin versant de l'Oued Bouzerag.	111
Tableau 28. Densités de drainage des trois sous-bassins versant.	112
Tableau 29. Fréquence des talwegs des trois sous-bassins versants.	112
Tableau 30. Hypsométrie des trois sous-bassin versants.	113
Tableau 31. Répartition des classes d'érodibilité (K) du sous-bassin de l'Oued Rhirane.	116
Tableau 32. Répartition des classes d'érodibilité (K) du sous-bassin de l'Oued Melah.	119
Tableau 33. Répartition des classes d'érodibilité (K) du sous-bassin de l'Oued Bouzerag.	120
Tableau 34. Matrices de corrélation entre l'érodibilité du sol et les paramètres physico-chimiques.	122
Tableau 35. Répartitions des classes du d'érosivité des pluies (R) du sous-bassin de l'Oued Rhirane. ...	124
Tableau 36. Répartitions des classes d'érosivité des pluies (R) du sous-bassin de l'Oued Melah.	125
Tableau 37. Répartitions des classes d'érosivité des pluies (R) du sous-bassin de l'Oued Bouzerag,	126
Tableau 38. Répartition des classes des pentes du sous-bassin de l'Oued Rhirane.	128
Tableau 39. Répartition des classes des pentes du sous-bassin du sous-bassin l'Oued Melah.	130

Tableau 40. Répartition des classes des pentes du sous-bassin de l'Oued Bouzerag.....	131
Tableau 41. Répartition des classes du facteur C du sous-bassin de l'Oued Rhirane.	132
Tableau 42. Répartition des classes du facteur C du sous-bassin de l'Oued Melah.....	134
Tableau 43. Répartition des classes du facteur C du sous-bassin de l'Oued Bouzerag.....	135
Tableau 44. Résultats statistiques des pertes en sol dans la zone d'étude.....	135
Tableau 45. Classes et intensité des pertes en sol dans le sous-bassin versant de l'Oued Rhirane.	136
Tableau 46. Classes et intensité des pertes en sol dans le sous-bassin de l'Oued Melah.	138
Tableau 47. Classes et intensité des pertes en sol dans le sous-bassin versant de l'Oued Bouzerag.....	140
Tableau 48. Classes de sensibilité à l'érosion du sous-bassin de l'Oued Rhirane.....	143
Tableau 49. Classes de sensibilité à l'érosion du sous-bassin de l'Oued Melah.	144
Tableau 50. Classes de sensibilité à l'érosion du sous-bassin de l'Oued Bouzerag.....	145
Tableau 51. Valeurs de la dégradation spécifique de la zone d'étude.	148
Tableau 52. Résultat des calculs des valeurs estimées.	150

Liste des figures

Figure 1. Erosion en nappe dans le sous-bassin versant de l'Oued Bouzerag.....	9
Figure 2. Erosion par griffes dans le bassin versant de l'Oued Rhirane.....	10
Figure 3. Photos montrant l'érosion en rigoles dans le bassin de l'Oued Rhirane.....	11
Figure 4. Photos montrant l'érosion en ravine évoluant par érosion régressive (flèche).....	12
Figure 5. Photos montrant des glissements de terrain le long de l'Oued Melah.....	14
Figure 6. Photo montrant la perturbation de la topographie par la création d'une piste pour un chantier..	18
Figure 7. Situation géographique du sous-bassin versant de l'Oued Rhirane.....	30
Figure 8. Situation géographique du sous-bassin versant de l'Oued Melah.....	31
Figure 9. Situation géographique du sous-bassin versant de l'Oued Bouzerag.....	32
Figure 10. Répartition des stations pluviométriques au niveaux des 3 sous-bassin versants.....	33
Figure 11. Diagramme climatique d'Emberger des trois stations étudiées.....	35
Figure 12. Précipitations annuelles de la période 1990-2022 des 3 stations pluviométriques.....	37
Figure 13. Variabilité mensuelle des précipitations dans les trois stations pluviométriques.....	38
Figure 14. Représentation du régime saisonnier des précipitations.....	40
Figure 15. Diagramme climatique d'Emberger des zones étudiées.....	43
Figure 16. Carte lithologique du sous-bassin de l'Oued Rhirane.....	45
Figure 17. Carte lithologique du sous-bassin versant de l'Oued Melah.....	47
Figure 18. Carte lithologique du sous-bassin versant de l'Oued Bouzerag.....	48
Figure 19. Carte des types de sol du sous-bassin versant de l'Oued Rhirane.....	49
Figure 20. Carte des types de sol du sous-bassin versant de l'Oued Melah.....	51
Figure 21. Carte des types de sol du sous-bassin versant de l'Oued Bouzerag.....	52
Figure 22. Carte des pentes du sous-bassin versant de l'Oued Rhirane.....	54
Figure 23. Carte des pentes du sous-bassin versant de l'Oued Melah.....	55
Figure 24. Carte des pentes du sous-bassin versant de l'Oued Bouzerag.....	57
Figure 25. Occupation du sol du sous-bassin versant de l'Oued Rhirane.....	58
Figure 26. Occupation du sol du sous-bassin versant de l'Oued Melah.....	60
Figure 27. Occupation du sol du sous-bassin versant de l'Oued Bouzerag.....	61
Figure 28. Echantillonnage sur terrain d'étude à l'aide d'un GPS.....	64
Figure 29. Echantillons séchés et conservés dans des sacs en plastique.....	64
Figure 30. Tamisage des échantillons collecté.....	65
Figure 31. Détermination du carbone organique.....	67
Figure 32. Photos montrant les étapes du protocole de la granulométrie.....	69
Figure 33. Présentation d'un semi-variogramme.....	70
Figure 34. Photo montrant l'image satellitaire de la zone d'étude.....	85
Figure 35. Photo montrant le résultat après classification supervisé.....	86
Figure 36. Photo montrant image après identification des zones d'occupation du sol.....	86
Figure 37. Carte d'occupation du sol finale après amélioration.....	87
Figure 38. Carte du pH-H ₂ O et pH-KCl du sous-bassin versant de l'Oued Rhirane.....	97
Figure 39. Carte du pH-H ₂ O et pH-KCl du sous-bassin versant de l'Oued Melah.....	99
Figure 40. Carte du pH-H ₂ O et pH-KCl du sous-bassin versant de l'Oued Bouzerag.....	100
Figure 41. Conductivité électrique du sous-bassin versant de l'Oued Rhirane.....	102
Figure 42. Conductivité électrique du sous-bassin versant de l'Oued Melah.....	103

Figure 43. Conductivité électrique du sous-bassin versant de l'Oued Bouzerag.	104
Figure 44. Cartes des propriétés du sol et de la répartition de la matière organique, argile, limon et sable de l'Oued Rhirane.	107
Figure 45. Cartes des propriétés du sol et de la répartition de la matière organique, argile, limon et sable de l'Oued Melah.	109
Figure 46. Cartes des propriétés du sol et de la répartition de la matière organique, argile, limon et sable de l'Oued Bouzerag.	110
Figure 47. Courbes hypsométriques des trois sous-bassins de la zone d'étude.	114
Figure 48. Facteur d'érodibilité du sol du sous-bassin versant de l'Oued Rhirane.	116
Figure 49. Facteur d'érodibilité du sol du sous-bassin versant de l'Oued Melah.	118
Figure 50. Facteur d'érodibilité du sol du sous-bassin versant de l'Oued Bouzerag.	120
Figure 51. Carte du facteur d'érosivité des pluies (R) du sous-bassin de l'Oued Rhirane.	124
Figure 52. Carte du facteur d'érosivité des pluies (R) du sous-bassin de l'Oued Melah.	125
Figure 53 . Carte du facteur d'érosivité des pluies (R) du sous-bassin de l'Oued Bouzerag.	126
Figure 54. Carte du facteur LS du sous-bassin de l'Oued Rhirane.	128
Figure 55. Carte du facteur LS du sous-bassin de l'Oued Melah.	129
Figure 56. Carte du facteur LS du sous-bassin de l'Oued Bouzerag.	131
Figure 57. Carte du facteur C du sous-bassin de l'Oued Rhirane.	132
Figure 58. Carte du facteur C du sous-bassin de l'Oued Melah.	133
Figure 59. Carte du facteur C du sous-bassin de l'Oued Bouzerag.	134
Figure 60. Répartition des pertes en sol du sous-bassin de l'Oued Rhirane.	136
Figure 61. Répartition des pertes en sol du sous-bassin de l'Oued Melah.	138
Figure 62. Répartition des pertes en sol du sous-bassin de l'Oued Bouzerag.	140
Figure 63. Carte de la sensibilité à l'érosion du sous-bassin de l'Oued Rhirane.	144
Figure 64. Carte de la sensibilité à l'érosion dans le sous-bassin de l'Oued Melah.	145
Figure 65. Carte de la sensibilité à l'érosion du sous-bassin de l'Oued Bouzerag.	146

Table des matières

RÉSUMÉ	I
ABSTRACT	III
ملخص.....	V
DÉDICACES	VI
REMERCIEMENTS.....	VII
LISTE DES TABLEAUX.....	IX
LISTE DES FIGURES.....	XI
TABLE DES MATIÈRES.....	XIII
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1 : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE	
Introduction.....	7
1. Les processus de l'érosion hydrique.....	7
1.1. Détachement.....	7
1.2. Transport	8
1.3 Sédimentation.....	8
2. Les différentes formes de l'érosion.....	9
2.1. L'érosion en nappe.....	9
2.2. Erosion linéaire	10
2.2.1. L'érosion par griffes.....	10
2.2.2. L'érosion en rigoles	11
2.2.3. L'érosion en ravines	12
2.3. Erosion en masse.....	12
2.3.1. Les glissements lents	13
2.3.2. Les glissements rapides.....	13
2.3.3. Les coulées boueuses	14
2.4. Les facteurs de l'érosion hydrique	14
2.4.1. La topographie	14

2.4.2. Le facteur climatique	15
2.4.3. Le facteur lithologique.....	15
2.4.4. Le couvert végétal	16
2.4.5. Le facteur anthropique.....	17
2.5. Conséquences de l'érosion hydrique.....	18
2.5.1. Envasement des barrages	18
2.5.2. La perte des terres arables et la diminution de la fertilité des sols	19
2.5.3. La dégradation des infrastructures	19
2.5.4. Les conséquences sur l'agriculture.....	20
2.6. Modélisation.....	20
2.6.1. Les modèles empiriques	21
2.6.1.1. Modélisation spatiale.....	23
2.6.1.2. Le modèle SDR.....	24
2.6.2. Les modèles physiques.....	25
2.6.3. Les modèles conceptuels.....	26
2.7. Cartographie spatiale gérée par un SIG	26
Conclusion.....	28

CHAPITRE 2 : DESCRIPTION DU MILIEU PHYSIQUE DES BASSINS VERSANTS

Introduction.....	29
1. Situation géographique	29
1.1. Sous-bassin versant de l'Oued Rhirane.....	29
1.2. Sous-bassin versant de l'Oued Melah.....	30
1.3. Sous-Bassin versant de l'Oued Bouzerag.....	31
2. Analyse climatique	32
2.1. Répartition des stations pluviométriques dans la zone d'étude :.....	33
2.1.1. Le régime climatique	33
2.2. Pluviométrie	35
2.2.1. Pluviométrie annuelle	35
2.2.2. Pluviométrie mensuelle.....	37
2.2.3. Pluviométrie saisonnière.....	39
2.2.4. Coefficient pluviométrique.....	40
2.3. Température	41
2.4. Diagramme ombrothermique.....	42
3. Analyse lithologique.....	44
3.1. Sous-bassin versant de l'Oued Rhirane.....	44
3.2. Sous-bassin versant de l'Oued Melah.....	45

3.3. Sous-bassin versant de l'Oued Bouzerag.....	47
4. Analyse des sols	48
4.1. Sous-bassin versant de l'Oued Rhirane.....	48
4.2. Sous-bassin versant de l'Oued Melah.....	50
4.3. Sous-bassin versant de l'Oued Bouzerag.....	51
5. Analyse des pentes.....	52
5.1. Sous-bassin versant de l'Oued Rhirane.....	53
5.2. Les pentes du sous-bassin versant de l'Oued Melah	54
5.3. Les pentes sous-bassin versant de l'Oued Bouzerag	56
6. Analyse de la végétation.....	57
6.1. Analyse de la végétation de l'Oued Rhirane	58
6.2. Analyse de la végétation du sous-bassin de l'Oued Melah.....	59
6.3. Analyse de la végétation de l'oued Bouzerag	60
Conclusion.....	62

CHAPITRE 03 : MATÉRIELS ET MÉTHODES

Introduction.....	63
1.Méthodes d'échantillonnage	63
2. Prospection sur terrain	63
3.Analyses physico-chimiques des échantillons au laboratoire.....	64
3.1. Le potentiel hydrogène (pH).....	65
3.1.1 Détermination du pH-H ₂ O	66
3.1.2. Détermination du pH-KCl	66
3.2. La conductivité électrique du sol.....	66
3.3. La matière organique	67
3.4. La texture du sol (Granulométrie)	68
3.5. La structure du sol.....	69
4. Analyse géostatistique	69
5. Analyses statistiques	72
6. Analyse morphométrique.....	74
6.1. Relation de surface	74
6.1.1. Densité de drainage.....	74
6.1.2. Fréquence des talwegs	75

6.2. Relation de relief.....	75
6.2.1. Hypsométrie.....	75
7. Erodibilité des sols	76
8. Modélisation de la dégradation spécifique des sols.....	79
8.1. Modèle RUSLE	79
8.1.1. Facteur R	80
8.1.2. Facteur K	81
8.1.3. Facteur LS	82
8.1.4. Facteur C (Couverture végétale)	83
8.1.5. Facteur P	87
8.2. Carte de Sensibilité à l'érosion	88
8.2.1. Le facteur pente.....	88
8.2.2. Le facteur lithologie	88
8.2.3. Le facteur du couvert végétal.....	89
8.2.4. Le facteur d'érodibilité des sols (K)	89
8.3. Estimation de la dégradation spécifique.....	94
Conclusion	95

CHAPITRE 4 : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Introduction.....	96
1. Analyses Physico-Chimiques des sols	96
1.1. Analyse de pH.....	96
1.1.1. Sous-bassin versant de l'Oued Rhirane	96
1.1.2. Sous-bassin versant de L'Oued Melah	98
1.3.3. Sous-bassin versant de l'Oued Bouzerag	100
1.2. Analyse de la conductivité électrique	101
1.2.1. Sous-bassin versant de l'Oued Rhirane	101
1.2.2. Sous-bassin versant de l'Oued Melah	103
1.2.3. Sous-bassin versant du sous-bassin de l'Oued Bouzerag	104
1.2.4. Discussion sur le pH et la conductivité électrique.....	105
1.3. Analyse de la matière organique et la granulométrie.....	106
1.3.1. Sous-bassin versant de l'Oued Rhirane	106
1.3.2. Sous-bassin versant de l'Oued Melah	108
1.3.3. Sous-bassin versant de l'Oued Bouzerag	110
2. Analyse des paramètres morphométrique	111
2.1. Relation de surface	111
2.1.1. Evaluation de la densité de drainage.....	111
2.1.2. Fréquence des talwegs	112

2.2. Relation de relief.....	113
2.2.1. Hypsométrie.....	113
3. Analyse de l'érodibilité des sols (Facteur K).....	115
3.1. Sous-bassin de l'Oued Rhirane	115
3.2. Sous-bassin versant de l'Oued Melah.....	118
3.3. Sous-bassin versant de l'Oued Bouzerag.....	119
4. Analyse de l'érosion avec le modèle RUSLE	123
4.1. Estimation du facteur d'érosivité des pluies (R)	123
4.1.1. Sous-bassin versant de l'Oued Rhirane	123
4.1.2. Sous-bassin versant de l'Oued Melah	124
4.1.3. Sous-bassin versant de l'Oued Bouzerag.....	125
4.2. Estimation du facteur LS	127
4.2.1. Sous-bassin versant de l'Oued Rhirane	127
4.2.2. Sous-bassin versant de l'Oued Melah	128
4.2.3. Sous-bassin versant de l'Oued Bouzerag.....	130
4.3 Estimation du facteur C	131
4.3.1. Sous-bassin versant de l'Oued Rhirane	131
4.3.2. Sous-bassin versant de l'Oued Melah	133
4.3.3. Sous-bassin versant de l'Oued Bouzerag.....	134
4.4. Evaluation des pertes en sol.....	135
4.4.1. Sous-bassin versant de l'Oued Rhirane	136
4.4.2. Sous-bassin versant de l'Oued Melah	137
4.4.3. Sous-bassin versant de l'Oued Bouzerag.....	138
4.5. Discussion sur l'érodibilité et le modèle RUSLE	140
5. Cartographie et répartition des zones sensibles à l'érosion	142
5.1. Zones à grande sensibilité à l'érosion	143
5.2. Zones à sensibilité Moyenne	146
5.3. Zones à sensibilité faible.....	147
6. Estimation de la dégradation spécifique	148
Conclusion.....	151
CONCLUSION GÉNÉRALE	153
RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES.....	156
RÉFÉRENCES	159

INTRODUCTION GENERALE

1. Contexte général

L'érosion des sols est un phénomène courant qui se traduit par la perte de sol ou de matériaux de sol de leur source d'origine vers d'autres zones de dépôt sous l'effet de l'eau ou du vent. Bien qu'elle se produise naturellement, elle est souvent aggravée par l'activité humaine.

Le labourage intensif, la violation des méthodes agricoles du travail du sol et la couverture forestière insuffisante des bassins versants peuvent intensifier le processus de l'érosion. Il s'agit d'une conséquence directe de l'exploitation agricole qui peut nuire aux ressources naturelles, dégrader la qualité des sols et de l'eau et entraîner des problèmes de pollution de l'environnement, autant de facteurs susceptibles de mettre en péril la viabilité à long terme de l'agriculture (Guzman et al., 2015). Elle est également liée aux propriétés du sol qui influencent le mouvement des particules du sol, l'écoulement des eaux de ruissellement et le détachement causé par les gouttes de pluie.

L'érosion des sols par l'eau est le résultat de l'interaction d'une série complexe de processus physiques et chimiques influencés par divers paramètres, dont l'érodibilité du sol, qui indique le degré de vulnérabilité de la surface du sol à l'érosion. L'érodibilité du sol est un facteur essentiel pour estimer la perte de sol et appliquer des techniques de conservation du sol.

Au 21^e siècle, l'érosion des sols par l'eau est le principal problème qui menace globalement la productivité agricole et la durabilité des ressources naturelles (Ganasri and Ramesh, 2016 ; Mohammed et al, 2020), ainsi que la capacité du sol à stocker et à recycler le carbone, les nutriments et l'eau. L'érosion hydrique est le type d'érosion le plus répandu parmi les différents types d'érosion (hydrique, éolienne, chimique et biologique). On constate que 75 milliards de tonnes de sol sont perdues chaque année sur les terres arables, ce qui représente un coût annuel de 400 milliards de dollars pour la production agricole mondiale (ELD 2015). Selon la FAO 2017, l'érosion entraîne également une perte annuelle de 7,6 millions de tonnes de la production céréalière.

Près de la moitié des terres agricoles sont fortement dégradées, avec des taux d'érosion des sols mondiaux allant de 0,5 à 350 tonnes/ha par an (Blanco et Lal, 2010). Bien que 12,5 tonnes/ha puissent être représentées par un millimètre de sol, ce chiffre est souvent beaucoup plus élevé que le taux annuel de formation des sols (Blanco et al., 2010). En effet, les processus pédogénétiques

produisent typiquement entre 0,01 et 0,1 mm d'épaisseur de matériau édaphique par an, selon les chercheurs Weil et Brady (2017).

Selon Borrelli et al. (2017), les régions occidentales et centrales de l'Afrique, qui sont des pays en développement qui ont un taux élevé de déforestation et d'expansion des terres agricoles en raison de l'augmentation de la population, sont les principaux endroits où l'on s'attend à ce que l'érosion des sols augmente à l'avenir.

L'érosion hydrique des sols agricoles est un problème majeur qui touche de nombreux pays y compris l'Algérie. De nombreux facteurs mettent en péril les terres agricoles algériennes, en particulier dans les zones semi-arides. Il s'agit notamment de la pression des pâturages, de l'urbanisation, des pratiques agricoles, de l'exploitation forestière et de la pression démographique. Combinés aux effets exacerbés du changement climatique ; ces facteurs ont exposé les terres au ruissellement, ce qui a conduit à la dégradation des sols par l'érosion hydrique. Dans les zones semi-arides et les régions subhumides sèches, l'érosion hydrique est la principale cause de dégradation, tandis que l'érosion éolienne prédomine dans les zones arides.

Mostephaoui et al. 2013 ont estimés que plus de 20 % de la superficie totale du pays, soit $5 \times 10^5 \text{ km}^2$, est exposée à un risque de dégradation des terres dû à l'érosion hydrique et à la désertification. Parmi ceux-ci, $1,4 \times 10^5 \text{ km}^2$ sont les montagnes du nord affectées par l'érosion hydrique, $3,2 \times 10^5 \text{ km}^2$ sont les zones steppiques directement menacées par la désertification, et $4,1 \times 10^4 \text{ km}^2$ sont les forêts menacées par les effets du changement climatique. Selon Remini (2000), 20 hm^3 de la capacité de stockage d'eau sont perdue chaque année par les barrages en raison de l'envasement. En Algérie, l'érosion a des conséquences importantes sur l'environnement, l'agriculture et le développement social. Elle est responsable de l'appauvrissement des terres agricoles, de l'envasement des barrages, de la perte de fertilité des sols et de l'exode rural.

La planification et la mise en œuvre de mesures de conservation nécessitent une compréhension de la répartition spatiale du risque d'érosion. Afin d'évaluer les variations spatiales de l'érosion des sols, il est essentiel de choisir une méthode d'évaluation appropriée. Les progrès technologiques, tels que le développement de modèle d'érosion des sols et l'augmentation de la puissance de calcul pour l'analyse spatiale, ont contribué à rendre la modélisation de l'érosion des sols plus rapide et plus précise.

Les approches traditionnelles d'évaluation de la menace d'érosion des sols sont coûteuses et prennent du temps. L'intégration des modèles actuels d'érosion des sols avec les données de terrain et les données fournies par les technologies de télédétection grâce à l'utilisation de systèmes d'information géographique (SIG) s'est avérée très utile.

Les modèles d'érosion des sols permettent d'identifier les zones sensibles à l'érosion, d'estimer les taux d'érosion et de déterminer les causes plausibles de l'érosion, contribuant ainsi à la gestion des terres. Il existe des modèles empiriques relativement simples, des modèles conceptuels, et des modèles plus complexes basés sur l'approche physique (Merritt et al., 2003).

Les modèles d'érosion des sols, comme tous autres modèles, sont sujets à des erreurs et des incertitudes et ne peuvent rendre compte de toutes les interactions complexes de l'apport de sédiments. Par conséquent, à moins d'être correctement paramétrés et confirmés par rapport aux données réelles, les taux de perte de sol issus des modèles doivent être considérés comme les meilleures estimations disponibles des valeurs absolues (Wischmeier et Smith, 1978).

En réponse à ces inquiétudes, Wischmeier et Smith (1978) ont développé l'équation universelle de perte de sol (USLE) pour prévoir la perte de sol provoquée par l'érosion hydrique. Les chercheurs utilisent depuis longtemps cette méthode pour élaborer des plans de contrôle de l'érosion des sols, de l'utilisation des terres et des bassins versants. Cette équation propose un certain nombre d'options pour réduire les risques auxquels l'agriculture, les pâturages et les forêts sont confrontés en utilisant des approches facilement utilisables avec des coûts variés pour la gestion de l'utilisation des terres.

L'USLE est un modèle empirique créé pour calculer le taux moyen annuel d'érosion du sol (tonnes par unité de surface). Il a d'abord été conçu à l'échelle de la parcelle pour les terres agricoles des États-Unis d'Amérique. Ensuite il a été utilisé dans de nombreux autres pays, à d'autres échelles et dans de nombreuses zones géo-climatiques différentes. Une version révisée de l'USLE (RUSLE) a été publiée pour inclure de nouvelles cartes d'érosion pluviale pour les États-Unis d'Amérique et des améliorations de la méthode de calcul des différents facteurs USLE (Renard et al., 1997). RUSLE a introduit des modifications dans la manière dont l'effet de la topographie est incorporé dans le modèle, des valeurs actualisées pour refléter les efforts de conservation des sols, une méthode d'estimation des facteurs de couverture et de gestion, et des changements dans l'érodabilité du sol dus au gel-dégel et à l'humidité du sol (Renard and Freimund, 1994)

Le modèle USLE/RUSLE est largement utilisé pour évaluer et classer les bassins versants et identifier les zones critiques susceptibles d'être touchées par l'érosion hydrique grâce à son intégration avec la modélisation géospatiale, le SIG et les données d'imagerie satellitaire

Le taux de délivrance sédiment (SDR) est la quantité de l'érosion brute qui est transférée dans un laps de temps donné d'un bassin versant vers son exutoire. (Cao, X. et al. 2022). Comme le modèle RUSLE estime l'érosion brute en nappe et en rigole sans tenir compte du dépôt de sédiments ou de l'érosion des ravins/chenaux, le taux de délivrance sédiments (sediment delivery ratio, SDR) doit être défini pour déterminer la quantité de sédiments qui sera livrée au système de cours d'eau à partir de la zone de drainage située au-dessus (Renard et al., 1997). Ainsi, on peut prévoir le taux annuel d'érosion du sol et de production de sédiments dans le bassin adjacent en utilisant le modèle USLE en conjonction avec le SDR.

Les praticiens doivent être en mesure de quantifier la quantité de sol déplacé et de déterminer le degré d'érosion du sol afin d'élaborer et de mettre en œuvre des mesures efficaces de conservation du sol. Ceci peut être réalisé en fusionnant le SDR et l'USLE.

2. Problématique et objectif général de la thèse

Face aux défis croissants liés à l'érosion des sols, il devient de plus en plus important de bien comprendre la dynamique de l'érosion et ses facteurs déterminants. La dégradation des ressources en sol est une menace sérieuse posée par l'érosion des sols, qui est particulièrement visible dans les zones à vocation agricole, comme c'est le cas des bassins de la région de Hammam N'Bails, région de notre zone étude. Afin d'identifier les zones à risque majeur et de rechercher les remèdes appropriés, il est impératif d'établir des mesures en combinant les données issues de la caractérisation et de la modélisation des sols.

Cette recherche vise à étudier l'intensité de l'érosion hydrique qui touche les bassins versants choisis et de sensibiliser les décideurs aux enjeux socio-économiques et environnementaux de l'érosion naturelle et anthropique, ainsi que d'établir la priorisation des sites sur lesquels il faut intervenir en fonction du degré d'impact.

La détermination des propriétés et processus physico-chimiques des sols sont des clés essentielles à l'estimation du risque d'érosion du sol et au choix des pratiques culturales appropriées, orientées vers le développement durable.

La présente problématique s'inscrit dans la compréhension de la variabilité spatiale de l'érodibilité des sols et la modélisation de l'érosion hydrique au niveau des aires d'étude par le biais des méthodes quantitatives et semi-quantitatives.

Dans ce contexte et pour mieux comprendre l'influence de la variabilité des propriétés intrinsèques des sols sur le phénomène de la dégradation des milieux physiques à savoir les zones agricoles de l'extrême Nord-Est Algérien, on s'intéresse à la détermination des propriétés physiques des sols.

Pour répondre à cette problématique, nous proposons de traiter quatre questions générales complémentaires visant une meilleure connaissance de l'érosion des sols dans les milieux subhumides à semi arides, à savoir :

(i) La détermination de la répartition spatiale des propriétés intrinsèques du sol qui influencent son érodibilité afin d'identifier les propriétés physico-chimiques des sols sur lesquelles l'homme peut agir pour réduire l'érodibilité des sols cultivés. L'étude doit également insister sur la recherche de l'impact des techniques culturales sur l'évolution de la teneur en matière organique (MO) sur les terres en culture ainsi que sur la sensibilité à l'érosion évaluée au travers de mesures d'érodibilité du sol.

(ii) La cartographie géospatiale de l'érodibilité des sols par le biais de la technique de l'interpolation à savoir les méthodes de IDW (Inverse Distance Weighting) et le krigeage.

(iii) En l'absence de données du réseau de surveillance, le défi serait de caler le modèle RUSLE de Wischmeier, intégré sous un Système d'Information Géographique (Arcgis10.4) afin d'apporter une estimation des particules de sol susceptibles d'être arrachées et de spatialiser les zones les plus sensibles à l'érosion en nappe, sans prise en compte des dynamiques de transport/sédimentation des matières terrigènes.

(iv) La cartographie de la sensibilité des sols à être érodé à travers une approche cartographique détaillée par différents croisements des cartes lithologique, pente, occupation des sols, et de carte du facteur d'érodibilité du sol K ; cela permet de classer les terrains de la zone d'étude en fonction de leurs sensibilités à l'érosion hydrique lors de la création d'une carte de risque d'érosion des sols.

Les cartes spatiales finales de l'érosion constituent un outil de base permettant la prise de décision et l'élaboration de plans d'aménagement des bassins versants et la réhabilitation des oueds concernés.

3. Plan de travail

Dans le but de répondre aux objectifs de cette recherche, cette étude est conçue en cinq chapitres.

Dans le premier chapitre, nous présenterons une synthèse bibliographique, un aperçu du phénomène de la dégradation des sols actionnée par les eaux courantes, ainsi que ses facteurs et ses effets.

Le deuxième chapitre donnera un aperçu sur le contexte géographique de la zone d'étude et une étude des caractéristiques physiques (lithologie, pente, végétation, climat...) et des paramètres morphométriques des bassins versants de la zone d'étude.

Dans le troisième chapitre nous présenterons la méthodologie adoptée.

Le quatrième chapitre présentera les principaux résultats et discussion.

Le cinquième chapitre abordera les mesures de conservation des sols dans la zone d'étude.

CHAPITRE 1 :
Recherche Bibliographique

Introduction

Le sol est le substrat le plus important ayant un impact significatif sur la croissance des plantes. Il est formé par l'altération locale des composants rocheux et de composés minéraux apportés par le vent ou l'eau. La migration des terres arables d'un endroit à l'autre, qu'elle soit naturelle ou provoquée par l'homme, entraîne l'érosion des sols.

Roose (1994) a défini l'érosion comme un processus impliquant le détachement, le transport et la sédimentation des particules des sols par l'action de l'eau, du vent ou de la gravité. Il s'agit d'un phénomène complexe, de nature irrégulière, aléatoire et spatialement discontinue, difficile à décrire à l'aide d'équations mathématiques.

Dans ce chapitre nous nous intéresserons particulièrement à l'érosion hydrique qui est un phénomène très répandu dont les conséquences peuvent être des pertes irréversibles de terres et une réduction de la capacité de stockage des barrages.

1. Les processus de l'érosion hydrique

L'action érosive de l'eau sur le sol se déroule en trois phases distinctes : détachement, transport et sédimentation.

1.1. Détachement

L'action directe de la pluie provoque la séparation des particules de sol. Sous l'effet de l'impact des gouttes de pluie et de l'énergie cinétique qu'elles produisent, les particules de sol se séparent, détruisant ainsi la structure et provoquant un rebondissement du sol (effet de l'impact des pluies ou splash).

L'érosivité, qui est déterminée par la taille, la vitesse et l'intensité des gouttes de pluie, est un terme utilisé pour définir le potentiel érosif de la pluie. En raison de leur impact sur la surface du sol, les gouttes de pluie divisent, expulsent et transportent les particules de sol avant qu'elles ne se déposent sur la surface. Le terme "splash" est utilisé pour décrire cette projection de terre et d'eau. Sur les terrains en pente, les particules projetées par le "splash" sont transportées principalement vers le bas des pentes mais ne provoquent pas d'érosion sur les surfaces planes (Beczek et al 2022).

Cette phase s'accompagne d'une diminution de la porosité qui provoque le développement d'une croûte de battance superficielle, responsable en grande partie de la diminution de la capacité d'absorption d'eau du sol et de l'augmentation des risques d'érosion et de ruissellement. Ce processus se produit lorsque la résistance du sol à l'érosion est dépassée par la force érosive de l'impact des gouttes de pluie et le ruissellement de surface.

1.2. Transport

Dans les bassins en mouvement, les particules de sol détachées sont redistribuées sur de longues distances et peuvent être transportées par le système fluvial à travers différentes étapes de transport, de stockage et de remobilisation.

Lorsque la charge sédimentaire est inférieure à la capacité de transport d'écoulement, les particules du sol peuvent être transportées. Lorsque la charge dépasse la capacité de transport, les sédiments excédentaires se déposent. Le degré d'exposition de la lame d'eau à l'impact des gouttes de pluie influence grandement les exportations de sédiments causées par le ruissellement.

Lors de l'écoulement en nappe peu épais (écoulement diffus), la pluie a tendance à augmenter la concentration et la granulométrie de la charge solide exportée, (Chaplot et Le Bissonnais, 2000). D'autres facteurs, moins importants, comme la gravité et le vent, contribuent également au mouvement et au transport des particules de sol.

1.3 Sédimentation

Le mécanisme de sédimentation régule et peut limiter la quantité de sédiments exportés. Lorsque la capacité de transport d'un cours d'eau est dépassée, il y a sédimentation. Par conséquent, lorsque le débit diminue, la troisième étape du processus d'érosion hydrique (sédimentation) devient visible.

Selon l'environnement, les particules transportées se déposent en aval d'une parcelle agricole, dans un fossé, sur une route ou dans les lits des cours d'eau. Elles se déposent les unes après les autres en fonction de leur taille et du débit de l'eau. Les particules les plus fines doivent parcourir une plus longue distance avant de pouvoir se déposer, tandis que les particules les plus grossières se déposent le plus rapidement (Hao et al 2019).

2. Les différentes formes de l'érosion

2.1. L'érosion en nappe

Ce type d'érosion se produit sur toute la surface du sol. Les particules de sol sont détachées par la pluie et emportées par le ruissellement à la surface des terres agricoles, des forêts ou des pâturages. Il s'agit d'une érosion en nappe, où une fine pellicule d'eau s'écoule le long d'une pente douce en amont.

Les gouttes de pluie fournissent suffisamment d'énergie pour casser les liens chimiques et physiques entre les particules du sol dans les régions montagneuses. L'énergie des gouttes de pluie est appliquée à l'ensemble de la surface du sol et le transport des matériaux détachés est effectué par l'ensemble de la surface du sol. Les écoulements en nappe commencent à s'accumuler lorsque le sol devient saturé ou que l'intensité des précipitations dépasse la capacité d'infiltration (Zachar, 2011).

L'écoulement en nappe (sheetwash) érode et transporte les particules délogées sous la forme d'une fine pellicule d'eau sans trajectoire visible (Figure 1). Il s'agit de la première phase de la dégradation du sol provoquée par des processus érosifs.



Figure 1. Erosion en nappe dans le sous-bassin versant de l'Oued Bouzerag.

En Algérie, la perte de terre estimée par cette forme d'érosion est de 0,10 à 20 t ha⁻¹ an⁻¹ (Chebbani et al., 1999). Le transport des sédiments concerne principalement les particules fines telles que l'argile et le limon, ainsi que les matières organiques de faible densité tels que les résidus

de culture, les excréments d'animaux, le fumier animal ou les engrais appliqués sur les parcelles cultivées.

2.2. Erosion linéaire

Le processus d'érosion progresse à mesure que l'eau s'accumule et que de petits canaux, appelés rigoles (rills) et ravins (gullies), commencent à se former. L'usure et l'affouillement du chenal et des berges délogent des particules de sol supplémentaires et approfondissent le chenal. Pendant ce temps, l'eau s'écoule plus librement dans les chenaux, ce qui laisse plus d'eau pour le ruissellement que pour l'infiltration. Les rigoles ont une section de quelques centimètres et le ruissellement devient plus profond lorsque plusieurs rigoles se rejoignent et atteignent une profondeur de plus de 60 cm et une largeur de plus de 30 cm. (Poesen et al., 2003).

Les formes de l'érosion linéaire liée au ruissellement concentré sont nombreuses et spectaculaires :

2.2.1. L'érosion par griffes

Lorsque les eaux de ruissellement en surface se concentrent, ce qui entraîne la formation de chenaux étroits mais bien définis. Il s'agit de l'érosion du sol qui se produit dans des cours d'eau étroits. L'érosion par griffes se produit lorsque l'eau d'érosion en nappe se combine pour former de petits chenaux concentrés (Fortuin, 2006). Donc, l'érosion par griffes est la formation de petites voies d'écoulement concentrées et éphémères qui servent à la fois de sources et de voies d'acheminement des sédiments pour l'érosion des pentes des reliefs et versants (Figure 2).



Figure 2. Erosion par griffes dans le bassin versant de l'Oued Rhirane.

Le long des versants, les griffes apparaissent comme des lignes parallèles sur le terrain. Il s'agit de fines lignes de 10 cm de large et de 10 cm ou moins de profondeur. Leur longueur est surtout déterminée par l'action de l'eau et la longueur des pentes. Dans les parcelles travaillées, les griffes se développent jusqu'au niveau des jachères nues. Ces formes sont éliminées pendant les labours (Roose, 1994).

2.2.2. L'érosion en rigoles

Lorsque la capacité des pluies augmente (vitesse entre 30 et 60 cm/s), des sillons se créent et se distinguent généralement par une largeur de 20 à 30 cm (Figure 3). La terre s'érode de façon irrégulière et de petites ravines apparaissent, entaillant le sol sur plusieurs centimètres de profondeur (FAO, 1976). Tandis que la longueur du sillon varie considérablement en fonction de la longueur des versants ; les rigoles apparaissent généralement lors des grandes averses (pluies torrentielles).

Cependant, les méthodes culturales peuvent éliminer les rigoles, mais lorsqu'aucun moyen n'a été utilisé pour empêcher leur avancée, le creusement des formations tendres s'effectuera. De même, les pratiques aratoires seront inefficaces lorsqu'elles évolueront en ravins et il ne peut y être remédié que par des moyens très coûteux : techniques de DRS (défense et restauration des sols).



Figure 3. Photos montrant l'érosion en rigoles dans le bassin de l'Oued Rhirane.

2.2.3. L'érosion en ravines

L'érosion par ravinement (gully erosion) est définie comme le processus d'érosion dans lequel les eaux de ruissellement s'accablent et reviennent fréquemment dans des chenaux étroits, enlevant le sol de ces zones restreintes à de grandes profondeurs sur de courtes périodes de temps (Poesen et al., 2003).

L'érosion par ravinement est le déplacement du sol causé par les courants d'eau les plus importants. Ce type d'érosion crée des sillons dans le sol à une profondeur d'un pied qui ne peuvent pas être entièrement aplanis par les pratiques agricoles courantes (Figure 4). Les taux d'érosion augmentent lorsque l'érosion par ravinement commence en raison de la vitesse accrue des flux. Lorsque l'eau des griffes se concentre pour former des chenaux plus larges, l'érosion par ravinement se produit (Fortuin, 2006).



Figure 4. Photos montrant l'érosion en ravine évoluant par érosion régressive (flèche).

2.3. Erosion en masse

Le mouvement de masse désigne le processus naturel par lequel le sol, la roche et d'autres matériaux glissent le long d'une pente sous l'influence de la gravité. Les mouvements de masses dénotent souvent une évolution extrêmement avancée de l'érosion, voire irréversible. En effet, ils

sont particulièrement fréquents sur les sols marneux et argileux. Ces occurrences présentent un paysage chaotique sur les pentes qu'elles influencent (Roose, 1994).

Les mouvements de masse comprennent, l'écoulement du sol, les éboulements, les glissements de terrain et les avalanches. Il est généralement causé par l'excavation, les charges de poids des bâtiments ou des remblais et la perte de racines stabilisatrices en raison de l'élimination de la végétation.

La quantité de sédiments transportés dans les rivières par les mouvements de masse dépasse largement celle apportée par les ruisseaux, les écoulements de surface et les ravines (Morgan, 2005).

2.3.1. Les glissements lents

Ce phénomène s'observe typiquement sur les pentes raides et se caractérise par un glissement plus ou moins lent des couches superficielles de la couverture du sol, le plus souvent sans rupture. C'est grâce à la base en forme de crosse des arbres adultes et des jeunes arbres de la forêt qu'on peut distinguer ce type de mouvement. Dans les endroits sylvo-pastoraux, le déplacement des animaux vers le bas des pentes peut également entraîner la création d'escaliers entourés de réseaux de fractures (Moeyrsons, 1989).

2.3.2. Les glissements rapides

Les glissements de terrain en planche sont des détachements d'au moins une couche de sol plus importante qui glisse sur un horizon plus compact (généralement de la roche altérée) qui sert de plan de glissement (Figure 5).

Ce phénomène géomorphologique est souvent déclenché par des précipitations intenses, qui saturent le sol, réduisent sa cohésion et augmentent les forces de cisaillement. Les pentes fortes et la géologie prédisposée contribuent également de manière significative à leur apparition. Les glissements de terrain peuvent se produire rapidement et avoir des conséquences dévastatrices pour les infrastructures et les communautés situées en aval de la zone touchée. Les chercheurs en géotechnique et en géologie étudient rigoureusement ces phénomènes afin de comprendre précisément leurs mécanismes et de concevoir des stratégies efficaces pour prévenir et atténuer les risques.



Figure 5. Photos montrant des glissements de terrain le long de l'Oued Melah.

2.3.3. Les coulées boueuses

Il s'agit de combinaisons de sol et d'eau extrêmement denses qui ont dépassé la limite de fluidité et qui transportent à grande vitesse des boues de taille importante et des pierres massives.

Au début, elles prennent la forme d'un canal fermé par une langue composée de matériaux de texture très diverse (cône alluvial, par exemple). Les nombreux cailloux et pierres de tailles diverses constituent les matériaux fins. Ils apparaissent souvent à la suite d'un glissement de terrain ou dans un ravin, lors d'une averse exceptionnellement forte, qui fait disparaître les années d'altération (Temple et Rapp, 1972). Ce type de mouvement de masse est absent ou peu important dans les trois bassins versants étudiés.

2.4. Les facteurs de l'érosion hydrique

L'intensité des précipitations et du ruissellement, la couverture végétale, l'érodabilité du sol, la topographie et les pratiques de gestion des sols ont tous un impact significatif sur l'érosion hydrique des sols (Ahamefule et al., 2018).

2.4.1. La topographie

Le facteur topographique a un impact substantiel sur l'érosion hydrique du sol. L'érosion extrême est généralement due à des altitudes hautes où les pentes deviennent raides et un ruissellement rapide. L'érosion peut être évitée par la conservation de la couverture végétale. En effet, la topographie est l'une des variables les plus importantes qui influencent l'érosion hydrique du sol et le transport des sédiments.

Ce phénomène est d'autant plus puissant que la pente s'allonge. En effet, le ruissellement est capable d'augmenter sa vitesse le long de la pente pour se concentrer en aval et provoquer une érosion sous forme de rigoles et de ravins. En revanche, à faible concentration (1 à 2%), le flux aura tendance à s'infiltrer dans le sol, favorisant le dépôt et la sédimentation des particules transportées. Cependant, lorsque l'intensité de la pluie dépasse la capacité d'infiltration, l'excès d'eau s'accumule en surface, provoquant un ruissellement.

La forme de la pente est également cruciale. Une pente convexe ou bosselée perd théoriquement plus de terre qu'une pente droite. Une pente concave ou creuse perd moins de sol (FAO, 1976). En effet, la forme et le gradient de la pente sont plus importants pour l'érosion hydrique que la longueur de la pente. Son impact est cependant loin d'être négligeable, car sur une pente plus longue s'accumule plus d'eau supplémentaire pour une quantité de précipitations similaire.

2.4.2. Le facteur climatique

L'érosion des sols est influencée par des facteurs climatiques tels que les précipitations, la température, le vent et l'humidité. Les précipitations et le ruissellement constituent les principaux apports d'énergie pour les processus d'érosion. Les gouttes de pluie agissent sur les particules du sol et provoquent l'érosion (tsitsagi et al., 2018). La perte de sol est directement liée aux précipitations, à la fois par la force de détachement des gouttes de pluie lorsqu'elles touchent la surface du sol et par le drainage. Les précipitations atmosphériques, principale source d'érosion hydrique, sont définies par leur hauteur, leur intensité et leur fréquence.

L'érosion pluviale est un facteur essentiel dans la recherche sur l'érosion des sols et est souvent évaluée à l'aide de paramètres pluviométriques (Wang et al., 2017).

Dans les régions semi-arides, les pluies peuvent être fortes et irrégulières. L'érosion hydrique peut être grave car le ruissellement enlève les particules du sol. En outre, un sol desséché est moins capable d'absorber et de retenir l'eau, ce qui accroît le risque d'érosion pendant les périodes de fortes précipitations (Wang et al, 2018).

2.4.3. Le facteur lithologique

Le type de roche est un facteur crucial dans l'érosion des sols. Il influe considérablement sur la résistance des roches à l'érosion. Les propriétés physiques et chimiques des roches, telles que

leur composition minérale, leur texture et leur degré de consolidation, déterminent la facilité avec laquelle elles se décomposent. Par exemple, les roches ignées et métamorphiques, qui sont généralement denses et solides, sont très résistantes à l'érosion en raison de leur structure cristalline compacte et de leurs minéraux durables. En revanche, les roches sédimentaires constituées de matériaux meubles tels que le grès ou l'argile sont plus facilement érodées car elles se désagrègent plus facilement lorsqu'elles sont exposées à l'eau et au vent.

La résistance des roches à l'érosion influe directement sur la formation des sols. Les sols issus de roches résistantes non fracturées, comme le granit, sont généralement plus minces et moins profonds, car les matériaux se décomposent lentement. En revanche, les roches plus tendres, comme le calcaire ou le schiste, se décomposent plus rapidement, ce qui entraîne la création de sols plus épais et souvent plus fertiles, mais aussi plus sujets à l'érosion. Il est important de comprendre comment le type de roche affecte l'érosion afin de prévoir et de gérer l'érosion du sol dans différentes zones géologiques.

2.4.4. Le couvert végétal

Le couvert végétal est un facteur primordial de protection du sol contre l'érosion hydrique. Lorsque la couverture végétale ou résiduelle du sol est minimale, le risque d'érosion augmente. Les résidus et la végétation protègent le sol de la force des pluies et des éclaboussures et tendent à réduire la vitesse de l'eau. Elles réduisent la vitesse du ruissellement et améliorent l'infiltration de l'eau dans le sol.

La couverture végétale dense et diversifiée des maquis et des forêts est essentielle pour prévenir l'érosion des sols. Les maquis, que l'on trouve dans les régions méditerranéennes et qui se composent principalement de buissons, d'arbustes et de petites plantes, ont une végétation robuste qui résiste aux conditions sèches, protégeant ainsi efficacement le sol contre l'érosion par l'eau. Les racines des plantes de la garrigue forment un réseau dense qui stabilise le sol, réduit les mouvements de surface et limite l'érosion causée par le ruissellement.

Les forêts offrent une protection contre l'érosion du sol grâce à leurs grands arbres, à leur sous-bois et à leur système racinaire profond. La litière forestière amortit l'impact de la pluie et réduit la vitesse de l'eau de surface, ce qui permet une meilleure absorption de l'eau par le sol. Par conséquent, les forêts contribuent à maintenir l'humidité du sol, à prévenir la perte de nutriments et à préserver la structure du sol.

Les cultures et les herbes denses contribuent à soutenir la structure des sols, réduisant ainsi leur érosion. L'érosion des sols est plus probable dans les zones où il y a moins de végétation.

De nombreuses propriétés protectrices des plantes contribuent à la prévention de l'érosion des sols. Elles réduisent l'impact de l'érosion par les gouttes de pluie et ralentissent le flux des eaux de ruissellement, ce qui permet à une plus grande quantité d'eau de s'infiltrer dans le sol.

En outre, la végétation facilite les processus microbiologiques et offre un soutien au sol grâce à son système racinaire. En outre, les feuilles et les branches des arbres protègent le sol en captant et réduisant l'énergie de la pluie.

2.4.5. Le facteur anthropique

La déforestation, le surpâturage, l'urbanisation et l'intensification de l'agriculture sont quelques exemples d'activités humaines susceptibles d'exacerber la dégradation des sols. Selon Roose et al. (1993), ces activités humaines provoquent des perturbations environnementales qui favorisent l'érosion et la détérioration du milieu naturel. Il a été démontré que le travail du sol a un impact significatif sur la quantité de gouttes de pluie qui s'infiltrent ou sur l'importance des précipitations qui commencent à tomber (Figure 6). Finalement, cet impact devient nul ou négatif après plusieurs jours de précipitations significatives.

Des conditions critiques apparaissent à la surface du sol lorsque la couverture végétale n'est plus en mesure de protéger efficacement le sol. Le travail du sol réduit la résistance à l'érosion de deux manières : d'une part, il rend le sol plus perméable et renforce les racines des plantes. La deuxième conséquence du labour est qu'il peut diluer les matières organiques et accélérer leur décomposition ; il peut compacter le sol en profondeur et peut nuire à la cohésion du sol et, par conséquent, à sa stabilité structurelle.

Il a été démontré également que le labourage a un impact significatif sur l'infiltration lors de faibles pluies ou au début de fortes pluies. Lorsque les fortes pluies se terminent ou après quelques épisodes pluvieux, cet effet devient négligeable, voire négatif (Hutchinson, 2006).



Figure 6. Photo montrant la perturbation de la topographie par la création d'une piste pour un chantier.

2.5. Conséquences de l'érosion hydrique

2.5.1. Envasement des barrages

L'érosion hydrique peut avoir un impact significatif sur les barrages, principalement par le biais d'un processus appelé envasement. Ce processus se produit lorsque les sédiments provenant de l'érosion du sol en amont sont transportés vers les réservoirs et s'y déposent progressivement.

Les barrages peuvent alors perdre une partie de leur capacité de rétention, ce qui réduit leur efficacité en matière de lutte contre les inondations, d'irrigation et de production d'énergie hydroélectrique. L'accumulation de sédiments peut également endommager les infrastructures et augmenter les coûts d'entretien. Pour atténuer ces effets négatifs, il est essentiel de recourir à des techniques de gestion durable des bassins hydrographiques, telles que le reboisement et la construction de pièges à sédiments.

Au fil du temps, l'accumulation de limon réduit la capacité de stockage des réservoirs, ce qui affecte leur viabilité à long terme pour l'irrigation agricole, la production d'énergie hydroélectrique et le contrôle du débit de l'eau. Ce phénomène a également d'importantes implications socio-économiques et environnementales, car il a un impact sur la gestion des risques d'inondation, la sécurité alimentaire et la disponibilité de l'eau.

Au cours des dernières années, le taux de sédimentation a changé en raison de l'érosion sévère des bassins versants. Au début des années 1980, environ 120 millions de tonnes de limon étaient extraites annuellement des bassins versants du nord de l'Algérie (Demmak, 1982). Une partie de ces sédiments est déposée dans les 57 grands barrages de l'Algérie. Le dépôt sédimentaire annuel prévu dans ces barrages était de 45 millions de m³ (Remini et Hallouche, 2007).

2.5.2. La perte des terres arables et la diminution de la fertilité des sols

Chaque année, de grandes étendues de terres fertiles sont perdues à cause de l'érosion en Algérie, en particulier dans les régions agricoles comme la Mitidja, une plaine fertile située dans le nord du pays. La Mitidja, par exemple, qui est cruciale pour la culture des céréales et des légumes, est fortement touchée par l'érosion éolienne et hydrique. La déforestation et le surpâturage aggravent ce problème, entraînant l'appauvrissement de la couche supérieure du sol nécessaire à la croissance des cultures.

Les terres agricoles autour de Tizi Ouzou, dans la région de Kabylie, illustrent également ce problème. L'érosion a causé la perte de la fertilité du sol et de la couche supérieure riche en nutriments. Des études ont montré que l'érosion hydrique a créé des ravines et réduit les terres arables. Dans la vallée de la Soummam, les pratiques agricoles non durables ont exacerbé la perte de sol et diminué sa qualité (Boudjemaa et al., 2010).

De plus, dans la région de l'Ouarsenis, les précipitations intenses et l'urbanisation rapide ont conduit à une dégradation importante des sols. Les analyses ont révélé une perte notable de matière organique dans ces sols et une capacité réduite à retenir l'eau, ce qui a un impact direct sur les rendements agricoles (Benali et al., 2015). Cette situation souligne la nécessité d'adopter des pratiques de gestion durable des terres pour lutter contre les effets de l'érosion et restaurer la fertilité des sols.

2.5.3. La dégradation des infrastructures

La plupart des ravinements prennent naissance sur les pentes le long des routes. De profonds ravins se forment le long des routes lorsque celles-ci ne sont pas suffisamment sécurisées, et les ramifications de ces ravins rongent les terres agricoles avoisinantes.

L'érosion des sols causée par l'eau le long des infrastructures, telles que les routes et les chemins, est un problème courant dans de nombreuses régions, y compris au Maghreb et en Algérie.

Des ravines se forment souvent sur les pentes à proximité des routes, surtout lorsqu'elles ne sont pas protégées par des caniveaux ou des systèmes de drainage. Ces ravines peuvent endommager les routes et entraîner la perte de terres agricoles. Ils peuvent également déstabiliser les pentes environnantes, augmentant ainsi le risque de glissements de terrain.

Dans les régions montagneuses de l'Algérie, les routes mal conçues ou mal entretenues sont souvent à l'origine de ravins qui dégradent les infrastructures et causent des pertes agricoles. Ce problème est aggravé par les fortes précipitations, qui peuvent rapidement éroder le sol exposé et créer de profonds gouffres. La gestion inadéquate des eaux de ruissellement le long des routes est un facteur important qui contribue à l'augmentation de l'érosion.

La recherche indique que l'érosion causée par les infrastructures routières peut être réduite par des interventions telles que la stabilisation des pentes, la mise en place d'une couverture végétale et l'amélioration des systèmes de drainage. Ces mesures contribuent à diminuer l'énergie des flux d'eau et à protéger les sols d'une érosion excessive, contribuant ainsi à la préservation des terres et des infrastructures.

2.5.4. Les conséquences sur l'agriculture

La capacité du sol à retenir l'eau et à la mettre à la disposition des plantes est diminuée par l'érosion hydrique. Les cultures sont alors exposées à des dommages hydriques plus fréquents et plus graves. Physiquement, la structure devient compacte et la perméabilité du sol diminue, ce qui entraîne une asphyxie pendant la saison des pluies. La disparition des horizons humifères O et A, riches en matière organique et en nutriments, laisse l'horizon B, plus argileux et moins fertile, exposé. Cela réduit la qualité de la terre arable, diminuant la fertilité et la capacité du sol à soutenir la croissance des plantes. La profondeur du sol n'est pas atteinte par l'eau et aucune réserve n'est créée pour la saison sèche. La faune et les bactéries diminuent chimiquement et physiologiquement, et la réserve d'humus se détériore, ce qui entraîne une alimentation insuffisante en azote. Le sol se dégrade rapidement, ne laissant qu'une armature stérile de matériaux grossiers une fois les éléments délicats disparus (Greco, 1966).

2.6. Modélisation

La plupart des modèles d'estimation de l'érosion sont basés sur la définition des facteurs d'entrée, des techniques statistiques, des observations, des mesures et expériences qui font

correspondre le modèle à la perte de sol. Ces modèles impliquent une modélisation mathématique ou physique et prennent en compte le processus complexe de l'érosion. Elles reposent sur la collecte d'un grand nombre de données expérimentales ou de terrain et sur leur traitement informatique.

La prévention, le contrôle et la cartographie spatiale de l'érosion des sols sont essentiels pour améliorer la gestion durable et la protection des ressources naturelles.

La modélisation de l'érosion des sols peut offrir des réponses quantitatives tout en étant cohérente dans l'estimation des phénomènes qui se produisent dans différents contextes. Cependant, le modèle diffère grandement en termes de complexité, de procédure d'examen et de données utilisées pour l'étalonnage et la validation du modèle. Il n'existe pas de modèle adapté à toutes les conditions, mais un modèle qui dépend de divers paramètres, tels que le but de l'utilisation et les caractéristiques du bassin versant (Merritt et al., 2003).

Il existe de nombreux modèles d'érosion hydrique dont les propriétés géospatiales et les niveaux de complexité varient (Karydas et al., 2014). Ces modèles décrivent l'interaction entre de nombreux paramètres (climat, végétation, type de sol, terrain, etc...) et le processus d'érosion à l'aide d'expressions mathématiques (Ghosal et Bhattacharya, 2021). Leur complexité va des modèles empiriques simples aux modèles physiques et conceptuel plus complexes. Cette classification est basée sur la complexité des algorithmes, les exigences en matière de données d'entrée, le processus de simulation et les techniques utilisées (Aksoy et Kavvas, 2005).

2.6.1. Les modèles empiriques

La quantification de l'érosion est généralement difficile. Elle est mesurée directement sur le terrain et son estimation est basée sur des modèles empiriques qui prennent en compte la prévalence de toutes les variables liées à l'érosion hydrique, y compris les variables naturelles telles que les types de sols, les précipitations et les sols, ainsi que les éléments artificiels tels que les pratiques culturales.

Les modèles empiriques, également connus sous le nom de modèles axés sur les données, reposent sur des observations et s'appuient largement sur la précision des données (Kokkonen et al., 2001). La plupart sont des modèles à boîte noire, ce qui signifie que l'on ne sait rien du processus interne qui régit l'écoulement (Kokkonen et al., 2001).

Les modèles sont simples à utiliser, car ils nécessitent un nombre minimal de paramètres. Les paramètres de ces modèles n'ont pas d'importance physique puisque le modèle n'a pas de véritables composantes de bassin versant. Leurs négligences des variations des apports et des caractéristiques, telles que les précipitations et les types de sol, et leur ignorance de la non-linéarité intrinsèque du système. Comme ils sont basés sur des données, les données d'entrée sont la principale source d'erreur, car la distorsion des données d'entrée a des conséquences majeures sur les résultats du modèle (Kokkonen et al., 2001). Ils sont les plus simples de tous les modèles puisqu'ils peuvent être créés avec un minimum de données et sont préférés pour la modélisation parce qu'ils sont simples à appliquer et ont des vitesses de calcul plus rapides et sont rentables. (Igwe et al., 2017).

Les modèles empiriques ont été largement utilisés, en particulier dans les contextes de manque de données, en raison de leur simplicité, de leurs besoins limités en données d'entrée et de leur faible coût informatique. Ils permettent d'identifier les zones sujettes à l'érosion, d'estimer les taux d'érosion et de déterminer les causes plausibles de l'érosion, ce qui contribue à une meilleure gestion des terres. Ces modèles peuvent être basés sur des méthodologies empiriques relativement simples.

Divers modèles d'érosion du sol se sont développés pour évaluer les taux de transport des sédiments et des nutriments dans le cadre de différents systèmes d'utilisation des terres et de classes de terres. Wischmeier et Smith (1965) ont proposé l'estimation de l'érodabilité (ou érodabilité) des sols et le modèle de l'équation universelle de perte de sol (USLE) afin de calculer la quantité d'érosion du sol dans les zones agricoles.

L'érodabilité du sol se réfère à la susceptibilité d'un sol à l'érosion par des agents érosifs comme l'eau. Il s'agit d'une expression composite des attributs du sol tels que la granulométrie du sol, perméabilité, matière organique et structure du sol qui affectent le comportement d'un sol. Entre autres, l'érosion des sols dépend des propriétés du sol, de la topographie, de l'utilisation des terres, de l'intensité des précipitations, de la couverture superficielle et des pratiques de gestion des terres. Le but de la cartographie de l'érodabilité des sols est de développer un ensemble de données qui facilite l'identification des sols vulnérables à l'érosion hydrique. La classification de l'érodabilité du sol, utilisée pour cartographier l'érodabilité du sol, définit la stabilité du sol de surface et la dispersivité du sous-sol et combine les deux dans une catégorie globale d'érodabilité inhérente du sol.

Le modèle USLE était basé sur l'idée de la séparation et du transport des particules à partir des précipitations. En 1978, l'équation a été modifiée. Il s'agit du modèle empirique d'érosion du sol le plus largement accepté et utilisé, qui a été créé pour estimer l'érosion due aux ruissellements diffus et aux rigoles sur la base d'un grand nombre de données expérimentales provenant de parcelles agricoles.

De nombreux chercheurs ont amélioré l'USLE au cours des 30 dernières années. L'USLE est à la base de Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE) (Williams, 1975) et de Revised Universal Soil Loss Equation RUSLE (Renard et al., 1997).

Lorsque le ministère américain de l'agriculture (USDA) a développé en 1996 une méthode d'estimation de l'érosion du sol dans des conditions de sol autres que les sites pilotes tels que les pâturages ou les forêts, RUSLE a été annoncé pour ajouter de nombreux facteurs, notamment la révision du facteur météorologique, le développement du facteur d'érosion du sol basé sur les changements saisonniers, le développement d'une nouvelle procédure de calcul pour estimer le facteur de la couverture végétale et la révision de la longueur et de la profondeur du profil du sol.

2.6.1.1. Modélisation spatiale

L'un des modèles empiriques largement utilisés, approuvés et mis en œuvre pour évaluer le risque d'érosion des sols est le modèle RUSLE (Zerihun et al., 2018). Il s'agit d'une technique efficace pour prévoir la production en sédiments, et donc de montrer les changements dans l'approvisionnement en sédiments dans les bassins versants, la production des terres agricoles et la dégradation des pâturages où le ruissellement se produit en raison d'une pluviométrie supérieure à l'infiltration. Elle est également efficace pour prévoir les taux d'érosion dans de vastes zones. De ce fait, la méthode RUSLE est fréquemment utilisée pour quantifier les pertes dues à l'érosion du sol, estimer le risque d'érosion du sol et guider la construction et la conservation des programmes de gestion de l'érosion dans diverse situation de couverture terrestre (Merritt et al., 2003).

En fonction des précipitations, des types de sol, de la topographie, des systèmes de culture et des pratiques de gestion, le modèle RUSLE peut prédire le taux d'érosion annuel moyen à long terme sur la pente d'un champ (Wischmeier et Smith, 1978). En outre, le modèle RUSLE sous un SIG peut être utilisé conjointement pour localiser rapidement et précisément les endroits où l'érosion des sols est importante dans un grand bassin (Khademalrasoul, & Amerikhah, 2020).

L'équation universelle révisée de perte de sol (RUSLE), comme l'USLE, utilise la même formule, mais avec des changements majeurs dans les éléments déterminants et une application plus large à diverses circonstances, telles que les régions perturbées, les pâturages et les forêts. La RUSLE montre comment le climat, le sol, la topographie et l'utilisation des terres affectent l'impact des gouttes de pluie et l'érosion par ruissellement de surface dans les sols en nappe et les sols ravinés (Renard, 1997). Elle ne tient pas compte de l'érosion par les ravines ou les chenaux.

En outre, le modèle doit être construit à partir de données historiques sur les précipitations régionales (Wischmeier et Smith, 1978). La plupart des décideurs et des gestionnaires des terres sont plus préoccupés par la distribution géographique du risque d'érosion du sol que par les valeurs absolues de perte de sol, malgré le fait que les modèles d'érosion du sol fournissent des données quantitatives sur la perte de sol à partir d'un emplacement donné.

Les cartes géospatiales des risques d'érosion des sols, qui montrent souvent l'étendue géographique et la gravité de la perte de sol, sont utilisées en conjonction avec les aspects socio-économiques et politiques pour soutenir les décisions politiques stratégiques.

2.6.1.2. Le modèle SDR

Souvent on se heurte à une estimation de l'érosion au niveau des versants (cas du modèle RUSLE) sans appréhender la quantification du transport solide issu des versants par les différents cours d'eau préliminaires où la charge en sédiment est ensuite transportée dans les ravins et oueds. Ainsi, il est impératif d'estimer la charge solide à l'exutoire du bassin versant en introduisant un autre paramètre comme complément au RUSLE. Il s'agit du ratio de livraison de sédiments (SDR, Sediment Delivery Ratio), qui est un outil crucial pour étendre l'acheminement des sédiments car il représente la relation entre la quantité totale d'érosion dans une région et la production de sédiments dans cette région (Lu et al., 2006).

Le SDR est considéré comme un lien entre l'étendue de l'érosion du sol et la production de sédiments qui en résulte, et en tant que tel, il est essentiel à la prédiction de la production de sédiments. Par conséquent, de nombreux chercheurs se sont intéressés aux méthodes de calcul du SDR. Initialement, les algorithmes de SDR reposaient principalement sur la définition de formules empiriques des facteurs d'influence.

Le SDR est important pour prédire la production de sédiments car il est considéré comme un intermédiaire entre l'érosion du sol et la quantité de sédiments produits. C'est pourquoi un certain nombre de chercheurs se sont intéressés aux techniques de calcul du SDR. La définition des facteurs d'influence ou des formules empiriques les concernant a d'abord servi de base aux algorithmes de SDR (Xie et Li, 2012).

Sur la base d'indicateurs hydrologiques dynamiques, tels que les précipitations et le ruissellement, ou de paramètres structurels statiques, tels que la taille du bassin versant et la densité des ravines, plusieurs chercheurs ont développé des algorithmes empiriques de SDR à un ou plusieurs facteurs pour des bassins versants particuliers (Xie et Li, 2012 ; Tao et Chen, 2015 ; Wu et al., 2018a). De plus, Wu et al. (2018b) ont amélioré les résultats de la simulation du débit solide (sediment yield) sédimentaire à l'échelle annuelle en proposant une méthode de SDR dynamique segmentée appropriée pour la majorité des bassins versants. Néanmoins, la distribution géographique et les mécanismes de transit ne sont pas encore décrits par les techniques de SDR susmentionnées.

2.6.2. Les modèles physiques

La compréhension des principes physiques sous-jacents aux processus hydrologiques est le fondement des modèles physiques, souvent connus sous le nom de modèles basés sur les processus ou de modèles mécanistes (Vaze, 2012). Plusieurs parties des réponses hydrologiques réelles dans le bassin descendant sont représentées par le modèle à l'aide d'équations physiques. Les équations du bilan hydrique, la conservation de la masse et de l'énergie, la quantité de mouvement et la cinématique sont les théories et principes généraux physiques utilisés.

Ces modèles reposent sur une connaissance de la physique des mécanismes d'érosion et de transport des sédiments (Deore, 2005). Les paramètres des modèles physiques sont, en théorie, quantifiables et donc connus (Merritt et al., 2003). En théorie, ils peuvent être utilisés en dehors de la plage d'étalonnage et, comme leurs propriétés ont une signification physique, ils peuvent être évalués à l'aide d'observations directes plutôt que d'enregistrements hydrométéorologiques détaillés (Saavedra, 2005). Les modèles basés sur la physique comprennent les modèles Morgan-Morgan et Finney (MMF), le projet Water Erosion Prédiction (WEPP) et l'outil d'évaluation des sols et de l'eau (SWAT).

2.6.3. Les modèles conceptuels

En reliant des éléments simplifiés de l'ensemble du processus hydrologique, les modèles conceptuels permettent de comprendre les processus de ruissellement. Elles sont basées sur des équations simplifiées du processus hydrologique physique et du stockage des réservoirs, qui offrent une compréhension conceptuelle des comportements dans un bassin versant. (Devi et al., 2015 ; Vaze, 2012).

Selon Morgan (2005), ces modèles expriment l'équation du bilan hydrique en convertissant les précipitations en ruissellement, évapotranspiration et eaux souterraines. Une équation mathématique est utilisée pour estimer chaque composante de l'équation du bilan hydrique. Sur la base de l'équation du bilan hydrique du bassin versant, le modèle simule les échanges d'eau entre l'atmosphère, les composants hydrologiques et les réservoirs de stockage. Ils sont devenus populaires dans la communauté des modélisateurs en raison de leur facilité d'utilisation et d'étalonnage. En outre, le modèle préalablement calibré peut être utilisé pour différents bassins versants (Vaze et al., 2012).

Ce modèle fonctionne mieux lorsque le temps de calcul est limité et que les caractéristiques du bassin versant ne sont pas examinées en détail. Le principal inconvénient du modèle est l'absence de prise en compte de la variabilité spatiale en raison de la simplicité du modèle et de la signification physique des équations et des paramètres qui le régissent (Pechlivanidis et al., 2011). Ces modèles acceptent les précipitations et le ruissellement comme intrants et produisent un débit solide en sédiments.

2.7. Cartographie spatiale gérée par un SIG

La cartographie constitue le moyen le plus adapté pour une bonne représentation spatiale. La géostatistique qui est une approche caractérisant la structure de la variabilité spatiale d'une propriété quelconque ainsi que son estimation s'avère être très appropriée pour cartographier un phénomène naturel.

Plusieurs études ont démontré les avantages potentiels de l'utilisation des systèmes d'information géographique (SIG) pour évaluer avec précision l'érosion des sols (Saha et al., 1991). Les progrès des technologies de télédétection et de SIG offrent des moyens efficaces pour modéliser l'érosion des sols, qui est un phénomène spatial (Yazidhi, 2003).

L'utilité potentielle des données de télédétection, y compris les photographies aériennes et les données des capteurs satellitaires, est bien reconnue pour la cartographie et l'évaluation des attributs du paysage qui influencent l'érosion du sol, tels que la physiographie, les sols, l'utilisation/la couverture des terres, le relief et le modèle d'érosion du sol (Pande et al., 1992). Dans un environnement SIG, il est possible de relier les données obtenues par télédétection à leurs emplacements spatiaux (Beck, 1987).

En général, l'utilisation des techniques de géo-information permet d'obtenir des estimations rapides et rentables, d'étudier de vastes zones, d'accroître les possibilités de surveillance continue de ces zones et d'affiner le modèle d'érosion du sol en fonction de l'échelle de sortie requise, allant d'une échelle globale approximative à une échelle locale plus précise. Selon Yazidhi (2003), l'utilisation de modèles numériques d'élévation et de SIG permet d'estimer les paramètres topographiques utiles à la modélisation de l'érosion des sols.

La compréhension de la distribution spatiale de l'érosion des sols est importante pour la gestion des ressources naturelles et la planification de l'utilisation des sols. Des techniques telles que la pondération par l'inverse de la distance (IDW) et le krigeage sont souvent utilisées pour estimer les propriétés du sol sur la base de données ponctuelles dispersées. Ces méthodes sont privilégiées car elles permettent de générer des estimations précises dans les zones où les données sont insuffisantes.

L'IDW est une méthode déterministe qui attribue des poids aux points de données en fonction de leur distance par rapport à un point inconnu. Plus un point de données est proche, plus il a d'impact sur l'estimation. Cette méthode est simple et rapide, mais elle peut manquer de précision dans des environnements géographiquement complexes.

Le krigeage quant à lui est une méthode géostatistique qui tient compte non seulement de la distance, mais aussi de la variabilité spatiale et des corrélations entre les données. Elle fournit une estimation plus précise et inclut une évaluation de l'erreur d'estimation. Le krigeage peut être particulièrement utile pour étudier l'érosion des sols, car il permet de modéliser la variabilité spatiale des facteurs qui influencent l'érosion, tels que les propriétés du sol et la topographie.

Conclusion

L'érosion des sols est un processus complexe influencé par divers facteurs naturels et anthropique. Les différentes formes d'érosion sont influencées par le climat, la topographie, la couverture végétale et les propriétés du sol. La capacité du sol à être détaché et transporté par l'eau ou le vent, connue sous le nom d'érodibilité du sol, est un facteur clé de l'érosion. Il est essentiel de comprendre et de contrôler l'érosion en raison de ses effets sur les sols et les bassins versants.

Dans ce chapitre on a abordé une recherche bibliographique sur différents modèles, allant des approches conceptuelles aux modèles physiques et empiriques tels que le RUSLE qui a été développé pour lutter contre l'érosion. Le modèle RUSLE prend en compte différents facteurs tels que l'érodabilité (facteur K) pour quantifier l'impact des caractéristiques du sol sur l'érosion, elle joue un rôle clé en déterminant la vulnérabilité des sols à l'érosion. En outre, le rapport de livraison des sédiments (SDR) et les études de sensibilité à l'érosion permettent d'évaluer la dynamique des sédiments et la vulnérabilité des différentes zones. Ainsi, ces modèles fournissent des outils robustes pour prédire et mesurer l'érosion, ainsi que pour évaluer la vulnérabilité de différentes zones.

CHAPITRE 2 :
Description Du Milieu Physique Des
Bassins Versants

Introduction

L'érosion est un problème complexe dans les bassins fluviaux du Nord-Est de l'Algérie. Ce chapitre se concentre sur la description du milieu physique des trois sous-bassins ; Oued Rhirane, Oued Bouzerag et l'Oued Melah, qui appartiennent au grand bassin versant de l'Oued Seybouse.

La situation géographique de ces sous-bassins versants est cruciale pour notre recherche car elle représente de nombreux des problèmes d'érosion complexe, ce qui pourrait avoir de graves conséquences pour l'environnement, l'agriculture locale et les habitants de la région.

Malgré la variété des données accessibles, ces sous-bassins versants ont été choisis comme bassins d'application pour notre recherche parce qu'ils n'ont fait l'objet d'aucune étude. Leurs caractéristiques physiques (Lithologie, hydrographie, couverture végétale, morphologie, etc.) seront étudiées dans ce chapitre pour caractériser les principaux facteurs intervenants dans le processus de l'érosion hydrique.

1. Situation géographique

1.1. Sous-bassin versant de l'Oued Rhirane

Le bassin versant de l'Oued Rhirane est l'un des sous-bassins du bassin du Mellah et son cours principal est un affluent de l'Oued R'biba. Ce dernier avec l'Oued Bourdine forment la rivière principale appelée Oued Mellah. La zone d'étude a une forme allongée avec une orientation SUD EST Nord-Ouest et occupe une superficie de 80,82 km². L'utilisation d'un modèle numérique d'élévation (MNE) pour délimiter le bassin versant de l'étude avec une résolution spatiale de 30 mètres (SRTM 1 Arc Seconde) a montré que l'altitude du bassin varie entre 302 m et 1277 m (Figure 7). Le système hydrographique de l'Oued Rhirane prend sa source dans un ensemble de reliefs montagneux composé des collines de Guelala (1243m), Mekmen (1287m), Ras el Arous (1156m) et el Koukez (1033m).

La zone d'étude est située dans le territoire de la wilaya de Guelma. Ses limites sont les méridiens 7°43' 0'' et 7° 50'0'' et les parallèles 36°17'30'' et 36°24'30'' (Figure 7). Elle se localise au niveau des villages de Dahouara et Oued Cheham, commune de Hammam N'Bails.

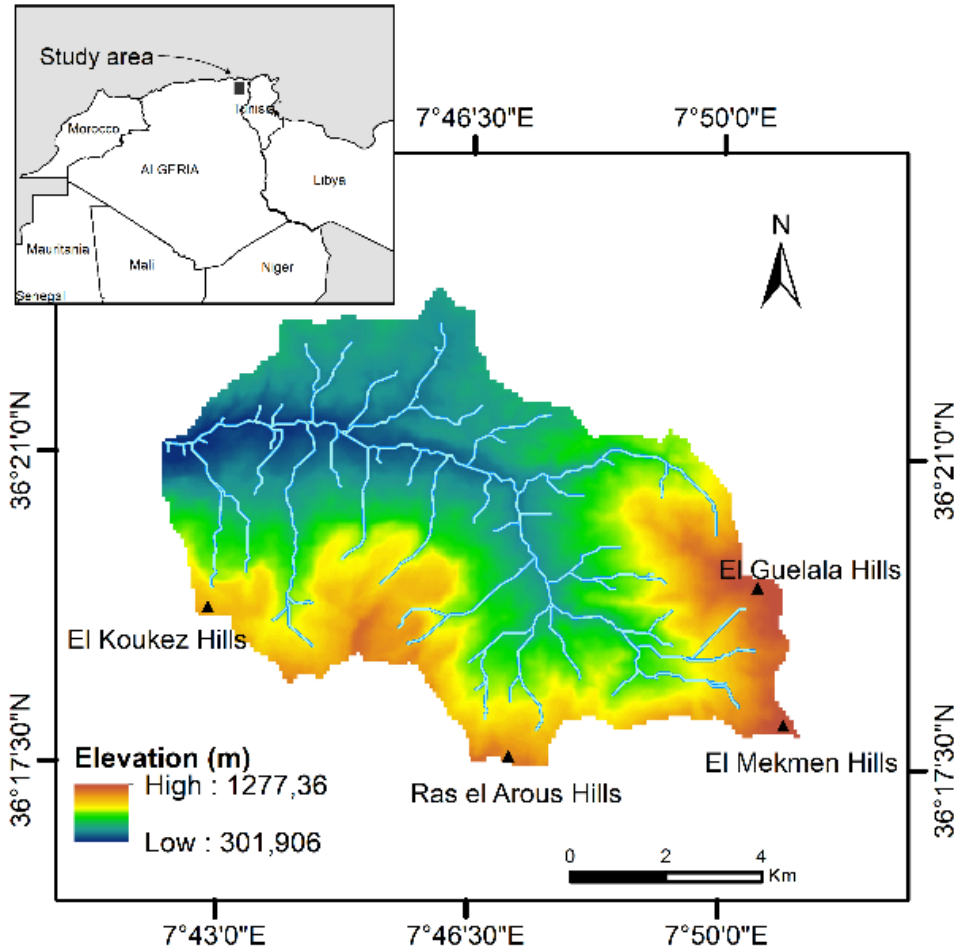


Figure 7. Situation géographique du sous-bassin versant de l'Oued Rhirane.

1.2. Sous-bassin versant de l'Oued Melah

Le sous-bassin versant de l'Oued Melah est l'un des sous-bassins versants qui composent le grand bassin de la Seybouse. Il est principalement situé dans la commune de Hammam N'Bails, wilaya de Guelma. La zone d'étude est bordée par les villages de Hammam N'Bails et El Barnous à l'est, et par le village de Boukraïma au nord. Le sous-bassin versant couvre une superficie de 39,14 km² et est délimité par les parallèles 36°18'00" et 36°24'00" Nord et les méridiens 07°34'00 et 7°42'00 Est (Figure 8). Il a une forme allongée exposé au Nord (63%) et Sud (37%).

Le système hydrographique de l'Oued Melah est issu d'un ensemble de reliefs montagneux comprenant : Koudiat Edrahm (1081m), Jbel Esafahli (979m), Koudiat el Fouara (938m), Koudiat el Assa (872m), et Jbel Hammara (718m).

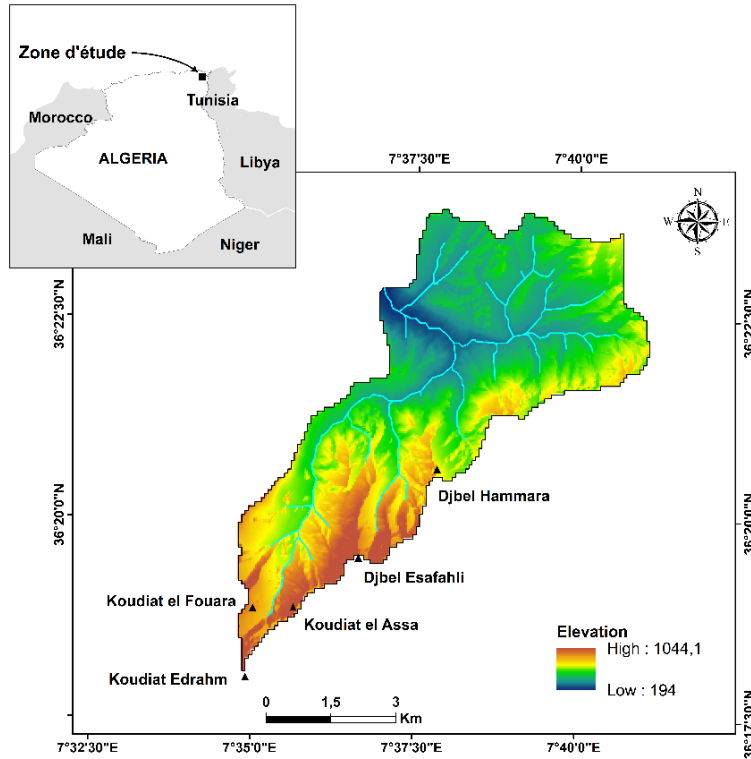


Figure 8. Situation géographique du sous-bassin versant de l'Oued Melah.

1.3. Sous-Bassin versant de l'Oued Bouzerag

Le principal cours d'eau du sous-bassin versant de l'Oued Bouzerag, qui fait l'objet de notre étude, est un affluent de la rivière Seybouse. Il est situé dans le nord-est de l'Algérie et draine une superficie de 29,62 km². S'étendant du sud (33%) au nord (67%), il est situé entre les latitudes nord de 07°38'00" et 07°44'00" et les longitudes est de 36°22'00" et 36°26'00" Est (Figure 9).

Ses frontières sont les suivantes : Boukraïma à l'ouest, Medjaz Sfa à l'Est, Djebel Nador au sud et Bouchegouf au nord.

Le système hydrographique de l'Oued Bouzerag prend sa source dans un ensemble de reliefs montagneux comprenant Jbel el Guerain (570 m), Koudiat el Fatoudja (654 m) et Koudiat el Guataya (737 m).

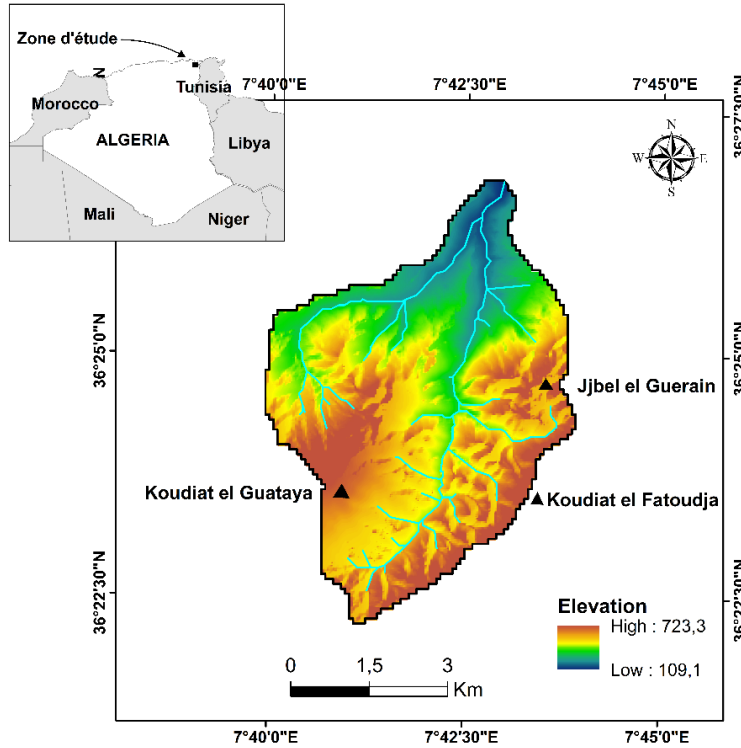


Figure 9. Situation géographique du sous-bassin versant de l'Oued Bouzerag.

2. Analyse climatique

Le climat désigne l'ensemble des phénomènes météorologiques, tels que la température, la pression atmosphérique, le vent, les précipitations et l'évapotranspiration, qui définissent l'état typique de l'atmosphère et ses changements dans une zone spécifique. Il est influencé par des facteurs tels que la situation géographique (latitude, altitude et position continentale) et la circulation atmosphérique. Le climat est un facteur naturel qui affecte le potentiel agricole d'un lieu. Il influence la formation et l'évolution du sol, ainsi que le développement des plantes. Généralement, ses actions sont indésirables dans le sens où il peut polluer ou dégrader l'environnement.

L'Algérie a un climat méditerranéen, la plupart des précipitations de l'année se produisant pendant les mois les plus froids. La sécheresse sévit pendant les mois les plus chauds, exposant l'Algérie à un « climat xérothermique ».

2.1. Répartition des stations pluviométriques dans la zone d'étude :

Afin de caractériser le climat de notre zone d'étude, nous avons sélectionné trois stations pluviométriques dans les trois sous-bassins versants : Hammam N'Bails, Mechroha et Dahouara (Figure 10).

En raison du manque de données observées, nous avons utilisé des données satellitaires provenant du site web TerraClimate. Une analyse de corrélation a été menée entre les données observées et estimées pour les années 1976 à 1996, aboutissant à un coefficient de corrélation de 0,72 ; ce qui indique que les données estimées sont fiables.

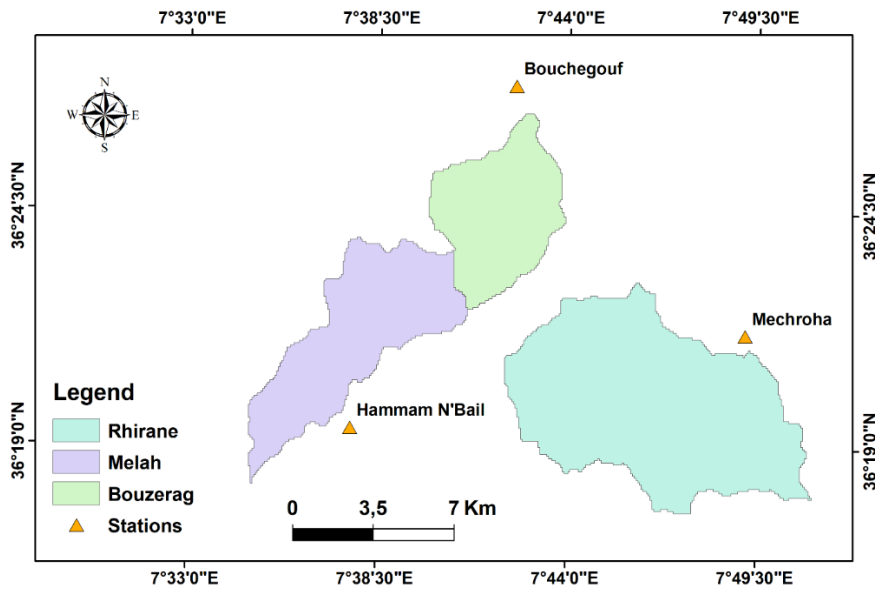


Figure 10. Répartition des stations pluviométriques au niveaux des 3 sous-bassin versants.

2.1.1. Le régime climatique

Le quotient pluviométrique d'Emberger, souvent appelé indice climatique, permet de déterminer le niveau d'humidité du climat et donc de classer les cinq différents climats méditerranéens, du plus aride au plus montagnoux. Le modèle prend en compte les précipitations annuelles (P), la température moyenne du mois le plus chaud (M) et la température moyenne du mois le plus froid (m) (Tableau 1).

Ce quotient est défini par la formule :

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

D'ou :

P : Pluviométrie annuelle en mm

M : La moyenne des températures du mois le plus chaud en kelvin

m : La moyenne des températures du mois le plus frais en Kelvin

Important : °K = °C+273,15

Tableau 1. Quotients pluviométriques des trois stations.

Stations	P(mm)	Q ₂
Mechroha	755,25	81,83
Bouchegouf	620,60	70,04
Hamam N'Bail	615,57	65,44

La zone d'étude présente une transition entre un climat semi-aride et un climat subhumide, comme le montre le diagramme climatique d'Emberger (Figure 11). La station de Mechroha présente un stade bioclimatique subhumide frais avec des températures modérées. Les étés peuvent être chauds mais rarement torrides, tandis que les hivers sont frais à froids. Cette zone connaît des précipitations importantes et des saisons distinctes.

Le climat de Hamam N'Bail est frais et semi-aride, avec une large amplitude thermique diurne, avec des températures maximales le jour et minimales la nuit. Les précipitations annuelles sont faibles et les variations saisonnières sont notables. Les étés sont souvent secs avec peu ou pas de précipitations, tandis que les hivers sont caractérisés par des précipitations plus régulières.

Bouchegouf présente un étage bioclimatique tempéré semi-aride, avec des étés chauds et des hivers doux. La région connaît des températures variables d'une saison à l'autre. Les précipitations sont souvent moins fréquentes et plus irrégulières, avec des conditions météorologiques sévères pendant certaines saisons. Les amplitudes thermiques diurnes, c'est-à-dire la différence de température entre le jour et la nuit, peuvent également être considérables.

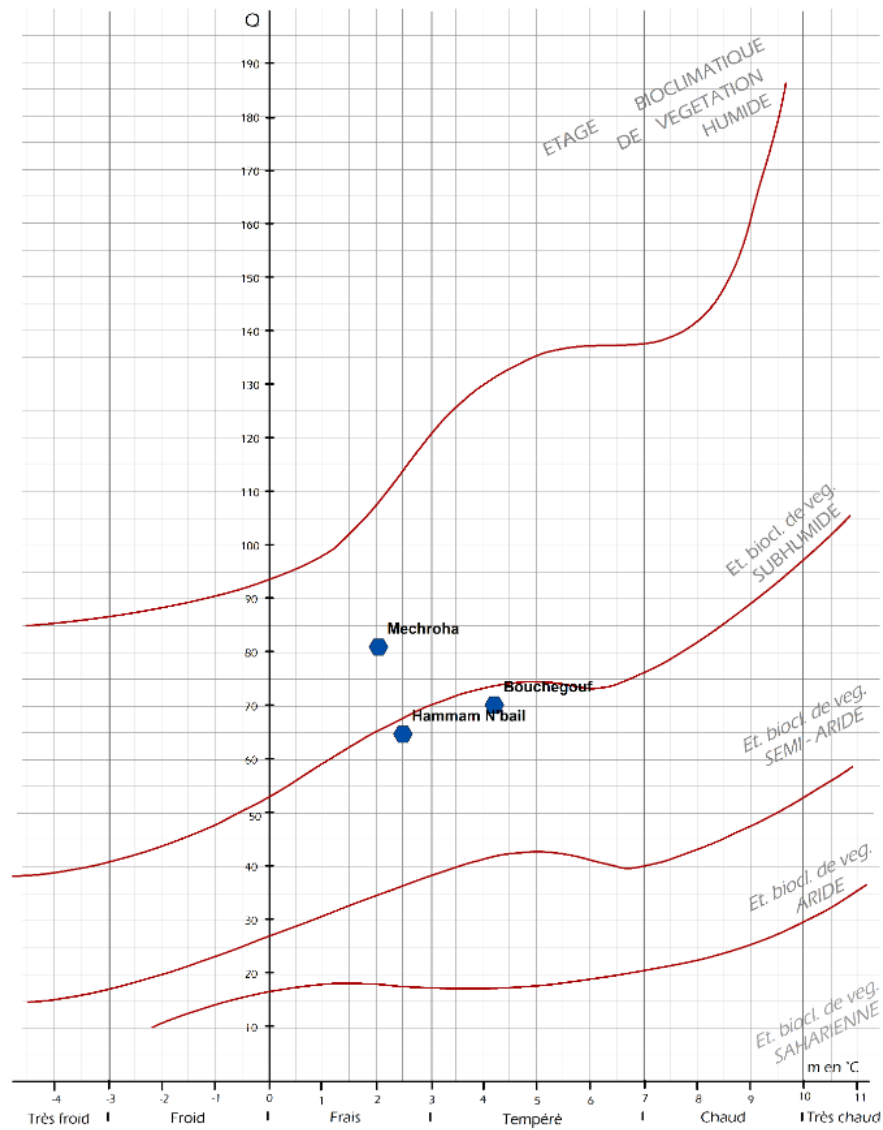


Figure 11. Diagramme climatique d'Emberger des trois stations étudiées.

2.2. Pluviométrie

2.2.1. Pluviométrie annuelle

L'élément principal influençant le type de climat est caractérisé par la pluviométrie, elle régle à la fois la dispersion du couvert végétal et la détérioration de l'environnement causée par les phénomènes d'érosion. La pluviométrie joue un rôle prépondérant en ce qui concerne l'érosion. La quantité et l'intensité des pluies déterminent et influencent l'érosion linéaire et en surface du sol.

La pluviométrie annuelle moyenne au niveau des sous-bassins est calculée en divisant les données pluviométriques annuelles totales des stations de Bouchegouf, Hammam N'Bail et Mechroha par le nombre d'années de la période de recherche, comme indiqué dans la formule ci-dessous.

$$\bar{P} = \frac{\sum P_i}{n}$$

Avec : \bar{P} : Précipitation moyenne

$\sum P_i$: la somme des précipitations annuelles

n : le nombre des années de la période d'étude

La période d'observation des trois stations est de 32 an et s'étale entre 1990 et 2022.

La pluviométrie moyenne annuelle des trois stations (Tableau 2) caractérisé par un régime pluviométrique qui varie entre 621,39 mm (station de Bouchegouf) et 615,57 mm (station de Hammam N'Bail) jusqu'au 755,25 mm (station Mechroha). Pour une meilleure explication nous avons représenté la répartition annuelle des précipitations des trois stations étudiées (Figure 12).

Tableau 2. Précipitation moyenne annuelles des trois stations pluviométriques.

Stations	P (mm)
Bouchegouf	621,39
Hammam N'Bail	615,57
Mechroha	755,25

Les relevés pluviométriques annuels des stations de Bouchegouf et de Hammam N'Bail sont assez comparables, alors que la station de Mechroha est plus arrosée.

Les précipitations varient considérablement d'une année à l'autre et d'une station à l'autre, comme l'illustre la figure 12. Cela suggère que la diversité des régimes pluviométriques, des périodes annuelles (sèches et humides) et des sections géographiques de l'étendue climatique de la région est due à une plus grande fluctuation des précipitations dans le temps d'une année à l'autre que de la distance entre les stations.

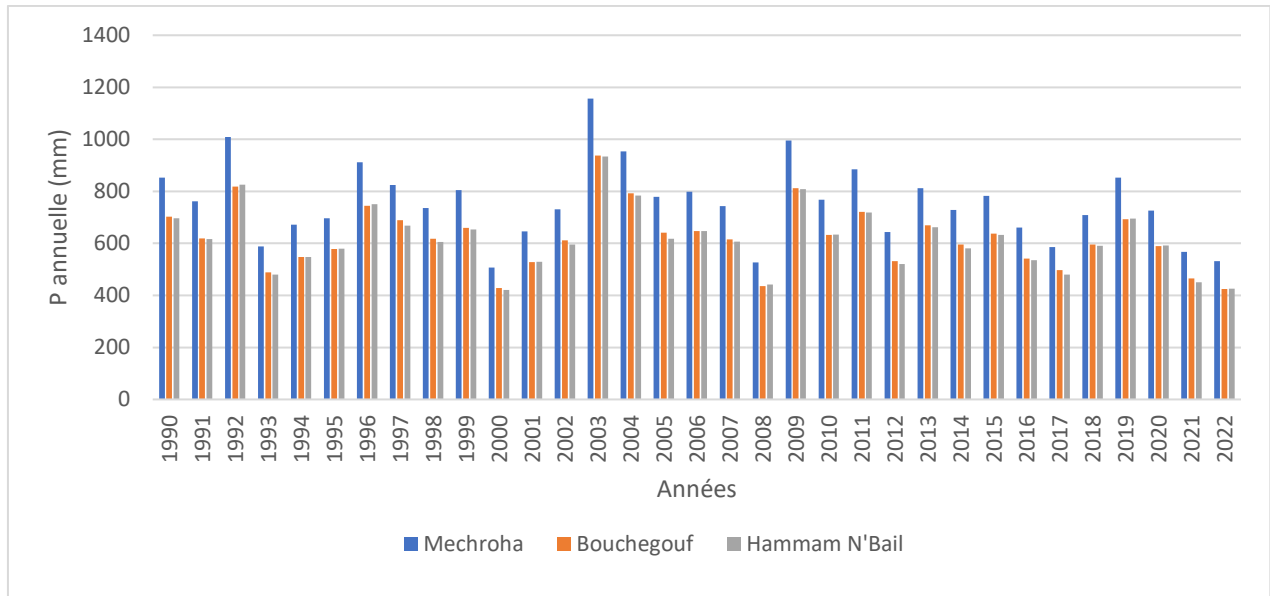


Figure 12. Précipitations annuelles de la période 1990-2022 des 3 stations pluviométriques.

Le coefficient de variation mesure la variabilité relative des précipitations d'une année à l'autre, il est essentiel pour comprendre les dynamiques hydrologiques qui influencent les processus d'érosion. Les coefficients de variation annuels de 19,14 %, 19,47 % et 19,56 % (Tableau 3), montrent que la variabilité des précipitations d'une année à l'autre est faible dans les trois stations. Cela suggère des conditions relativement stables, ce qui a des implications positives pour la gestion de l'érosion hydrique et la planification des ressources en eau.

Tableau 3. Variation annuelle des précipitations des trois stations pluviométriques.

Stations	Moyenne	Ecart-type	CV	CV %
Mechroha	756	147,88	0,20	19,56
Bouchegouf	621,39	118,92	0,19	19,14
Hammam N'Bail	616	119,94	0,19	19,47

2.2.2. Pluviométrie mensuelle

L'analyse des précipitations mensuelles révèle que les mois de décembre et janvier sont les mois les plus arrosés, tandis que juillet est le mois le plus sec pour les trois stations (Figure 13). L'évaluation des précipitations mensuelles pour les trois stations indique une augmentation des précipitations du mois de septembre au mois le plus pluvieux, celui de décembre, avec une tranche

d'eau de 121,94 mm pour la station Mechroha, 100,64 mm pour Bouchegouf et 98,03 mm pour Hammam N'Bail.

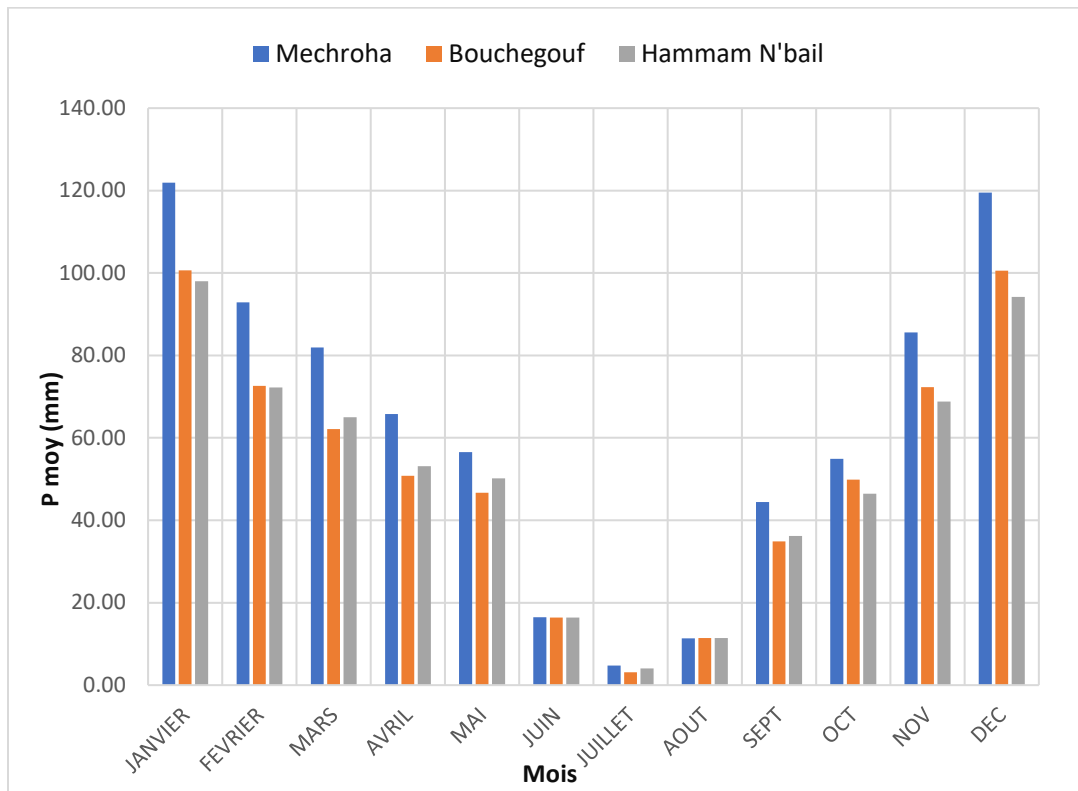


Figure 13. Variabilité mensuelle des précipitations dans les trois stations pluviométriques.

Après le mois de janvier le gradient mensuel des précipitations commence à diminuer, les mois de juillet et août sont les mois les plus secs avec des valeurs comprises entre 3,12 mm et 4,73 mm (Tableau 4).

En général, la répartition inter-mensuelle des précipitations se voit dans la saison pluvieuse qui s'étend de septembre à mai, tandis que la période sèche s'étend de juin à août, avec des taux de précipitations inférieurs à 17 mm.

Les coefficients de variation des précipitations mensuelles vont de 49,34 % à 93,76 % pour les 3 stations, ce qui indique une grande variabilité. L'éventail des valeurs de CV signifie que les précipitations mensuelles varient considérablement d'un mois à l'autre. Un coefficient de variation plus élevé indique des différences plus importantes entre les mois. Un CV de 93,76 % suggère que pour ce mois, les précipitations peuvent être presque deux fois plus élevées ou deux fois plus basses que la moyenne certains mois, ce qui témoigne d'une grande instabilité.

CHAPITRE 2 : Description Du Milieu Physique Des Bassins Versants

Tableau 4. Variations mensuelles des précipitations des trois stations pluviométriques.

Mechroha	JAN	FÉV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUL	AOÛ	SEP	OCT	NOV	DÉC
Précipitation moyenne	121,94	92,85	81,94	65,76	56,52	16,48	4,73	11,36	44,39	54,88	85,61	119,55
Écart type	70,83	61,49	42,04	35,02	31,91	13,65	4,47	9,67	22,29	31,50	49,81	65,42
CV	0,58	0,66	0,51	0,53	0,56	0,83	0,95	0,85	0,50	0,57	0,58	0,55
CV %	58,08	66,22	51,31	53,26	56,45	82,79	94,64	85,12	50,21	57,41	58,19	54,73

Bouchegouf	JAN	FÉV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUL	AOÛ	SEP	OCT	NOV	DÉC
Précipitation moyenne	100,64	72,61	62,15	50,76	46,67	16,39	3,12	11,45	34,91	49,88	72,27	100,55
Écart type	57,55	48,18	32,08	27,22	26,41	13,58	3,06	9,81	17,60	28,62	42,12	54,49
CV	0,57	0,66	0,52	0,54	0,57	0,83	0,98	0,86	0,50	0,57	0,58	0,54
CV %	57,18	66,36	51,62	53,63	56,59	82,85	98,02	85,62	50,41	57,37	58,28	54,20

Hamam N°bail	JAN	FÉV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUL	AOÛ	SEP	OCT	NOV	DÉC
Moyenne mensuelle	98,03	72,24	65,03	53,09	50,15	16,36	4,03	11,42	36,21	46,42	68,79	94,21
Écart type	57,78	47,70	33,44	28,15	28,34	13,38	3,78	9,67	17,87	26,95	40,23	51,86
CV	0,59	0,66	0,51	0,53	0,57	0,82	0,94	0,85	0,49	0,58	0,58	0,55
CV %	58,94	66,03	51,41	53,02	56,51	81,77	93,76	84,64	49,34	58,05	58,48	55,04

La forte variabilité des précipitations peut entraîner des épisodes de fortes pluies suivis de périodes sèches, ce qui peut intensifier l'érosion hydrique. Les sols peuvent ne pas être en mesure de se stabiliser entre les épisodes de pluie, ce qui entraîne une érosion plus importante lorsque de fortes pluies surviennent après une période de sécheresse donnant naissance à l'effet du « splash ».

2.2.3. Pluviométrie saisonnière

Selon l'histogramme (Figure 13) l'hiver est la saison la plus humide du fait que les précipitations sont importantes, la saison printanière et la saison automnales présentent des périodes de pluviosité presque identique.

Durant la saison de l'hiver l'érosion est légèrement réduite, du fait que les sols sont saturés en eau et que la végétation est assez importante ce qui favorise l'infiltration de l'eau dans le sol. En automne et au début de l'hiver, le couvert végétal est réduit et après la période sèche, les fortes

pluies intenses sur un sol sec favorisent le ruissellement au détriment de l'infiltration de l'eau, ce qui provoque une érosion assez importante.

La pluie se fait très rare en été, avec des valeurs inférieures à 32,58 mm ; cependant, cette saison est considérée comme une saison sèche de l'année.

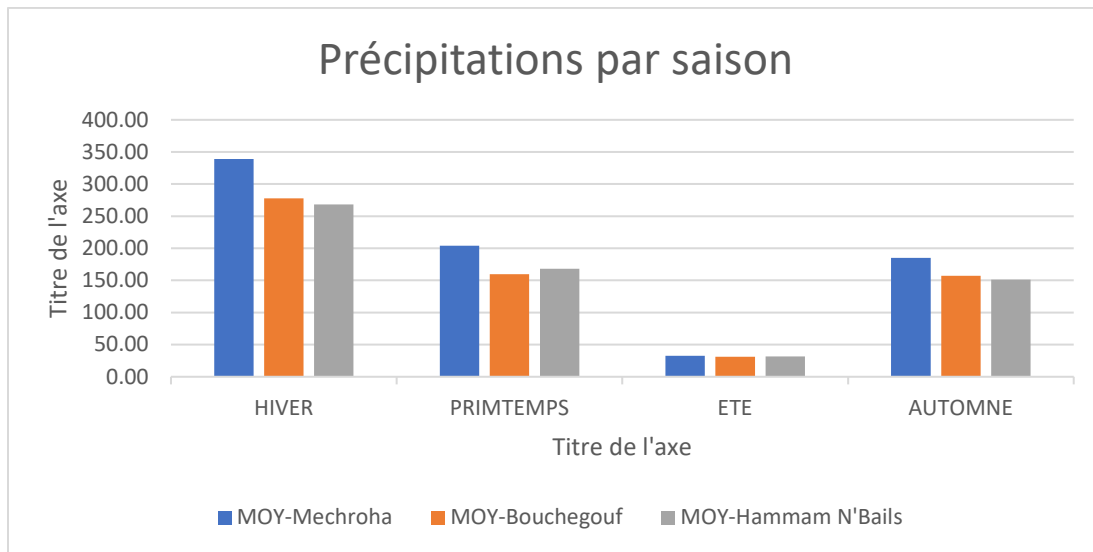


Figure 14. Représentation du régime saisonnier des précipitations.

2.2.4. Coefficient pluviométrique

Pour distinguer les années sèches des années humides, nous utilisons le coefficient de précipitations, qui est le rapport entre les précipitations annuelles et les précipitations moyenne annuelles.

Le coefficient est défini comme suit :

$$Cp = \frac{Pi}{\bar{P}}$$

D'où :

Pi : La précipitation annuelle (mm)

\bar{P} : Précipitation moyenne annuelle

Les coefficients de précipitations supérieurs à l'unité ($CP \geq 1$) indiquent une année humide, tandis que les coefficients inférieurs à l'unité ($CP < 1$) indiquent une année sèche.

Le nombre d'années humides et sèches est ensuite calculé pour chaque station (Tableau 5).

D'après le tableau 5 on remarque que le nombre d'années humide est inférieur à celui des années sèches pour les trois stations. Cette prédominance d'années sèches caractérise surtout la station de Bouchegouf comme étant la plus sèche par rapport aux autres stations avec une pluie moyenne annuelle de 621,39 mm. La valeur du coefficient pluviométrique varie d'une station à l'autre, elle est entre 15 et 16 pour les années humides et entre 17-18 pour les années sèches.

Tableau 5. Représentation du nombre d'années humides et sèches au niveau des trois stations.

Stations	Nombre d'années humides	Nombre d'années sèches
Mechroha	16	17
Bouchegouf	15	18
Hammam N'Bail	16	17

2.3. Température

La température de l'air est un facteur climatique aussi important que les précipitations. La température influe sur l'évaporation, le dégel et le développement des plantes. Cependant, la température a également un impact significatif sur la fluctuation des composantes du bilan hydrique.

La température de l'air dans les trois stations du sous-bassin versant (Bouchegouf, Hammam N'Bails et Mechroha) a été évaluée à l'aide de statistiques descriptives (valeurs moyennes). L'analyse a été réalisée à partir de données satellitaires obtenue depuis un site internet (TerraClimate) (Tableau 6).

Les trois stations présentent des variations saisonnières proches, mais leurs températures moyennes mettent en évidence des différences climatiques. La station Bouchegouf montre la température la plus élevée, avec une moyenne annuelle de 18,09°C.

En été, les températures maximales atteignent 34,95°C en juillet, ce qui en fait la station la plus chaude. Les températures minimales, bien que plus douces en hiver (environ 4,7°C en janvier), indiquent un climat globalement plus tempéré, avec des hivers moins rigoureux que dans les autres stations.

Tableau 6. Variations mensuelles des températures des trois stations pluviométriques.

Mechroha	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Min	2,02	2,48	4,42	6,79	10,21	13,80	17,00	17,30	15,32	12,09	7,29	3,32
Max	11,85	12,95	16,49	19,98	23,71	29,73	33,73	33,42	28,73	23,73	17,24	12,80
Moyenne	6,93	7,72	10,46	13,39	16,96	21,76	25,37	25,36	22,03	17,91	12,27	8,06

Boucheouf	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Min	4,70	5,14	6,71	9,34	12,84	16,10	19,22	19,78	17,88	14,28	10,05	6,12
Max	15,25	16,00	18,97	22,14	26,15	31,45	34,95	34,84	30,18	25,92	20,01	16,01
Moyenne	9,98	10,57	12,84	15,74	19,50	23,78	27,08	27,31	24,03	20,10	15,03	11,07

Hamam N'bail	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Min	2,65	2,94	4,74	7,53	10,80	14,44	17,94	18,15	15,89	12,01	7,86	3,92
Max	12,99	13,67	17,09	20,73	24,70	30,57	34,87	34,41	29,18	23,95	17,91	13,69
Moyenne	7,82	8,30	10,91	14,13	17,75	22,50	26,41	26,28	22,54	17,98	12,88	8,80

Hamam N'bail, situé entre Boucheouf et Mechroha, a une température moyenne annuelle de 16,36°C. Les températures estivales sont également élevées, atteignant jusqu'à 34,87°C en juillet, mais les températures hivernales minimales sont plutôt fraîches, environ 2,65°C en janvier, ce qui témoigne d'une variation saisonnière plus prononcée.

Enfin, la station Mechroha a la température moyenne annuelle la plus basse des trois, avec une moyenne de 15,69°C. Les températures estivales atteignent 33,73°C en juillet, tandis que les températures hivernales peuvent descendre jusqu'à 2,02°C en janvier. Cela indique un climat plus doux, qui peut être influencé par des altitudes plus élevées.

2.4. Diagramme ombrothermique

Pour le diagramme pluviométrique nous avons tracé les précipitations moyennes mensuelles et la variation de la température sur le même ensemble d'axes.

Nous avons porté les valeurs des températures moyennes à l'échelle double des précipitations moyennes mensuelles sur l'axe des ordonnées ; les différents mois de l'année figurent sur l'axe des abscisses (Figure 15), ce qui nous a permis de créer un diagramme pluviométrique afin de déterminer avec plus de précision les périodes humides et sèches.

CHAPITRE 2 : Description Du Milieu Physique Des Bassins Versants

L'analyse du diagramme ombro-thermique des trois stations fait apparaître deux périodes distinctes. La première période est une longue période humide de 7 mois qui s'étend d'Octobre à Mai pour les 3 stations. La seconde période est une période sèche de 5 mois allant de Mai à Septembre. Ainsi, on peut supposer que l'érosion hydrique est susceptible de se produire durant les 7 mois humides, avec une torrencialité dominante en automne et début de l'hiver (Décembre).

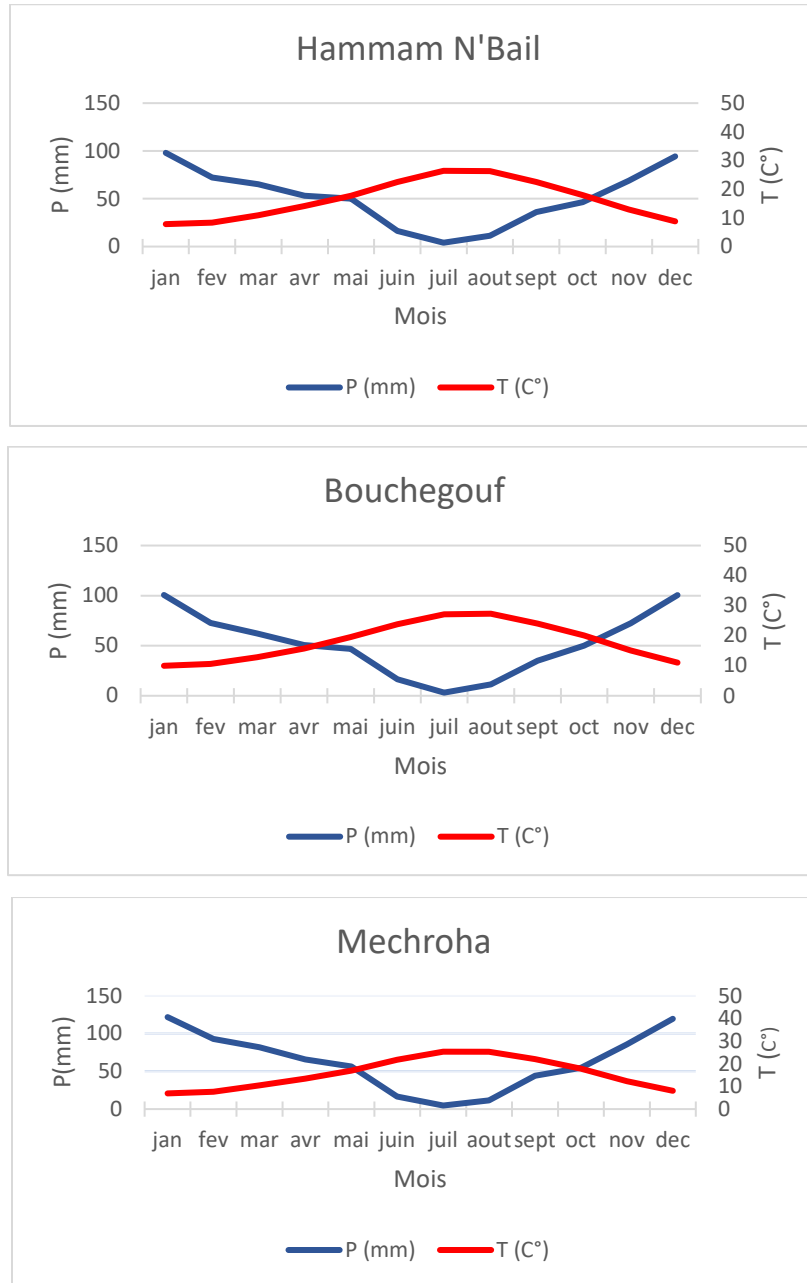


Figure 15. Diagramme climatique d'Emberger des zones étudiées.

3. Analyse lithologique

La lithologie joue un rôle essentiel dans l'érosion, le transport des matières solides, le ruissellement et l'infiltration. Les matériaux géologiques se répartissent en deux catégories : les formations consolidées (calcaire, dolomie et grès) et les formations meubles (sable, argile et marne).

Selon Demmak (1984) et Terfous et al. (2001), les caractéristiques lithologiques des matériaux et leurs variations physico-chimiques sont des facteurs importants dans les processus érosifs. À partir de la carte géologique de Souk Ahras à l'échelle 1:50 000, un travail cartographique a été réalisé sous ArcGIS.

3.1. Sous-bassin versant de l'Oued Rhirane

Le sous-bassin versant de l'Oued Rhirane présente des formations lithologiques très diversifiées allant du Quaternaire au Trias, les roches mère sont essentiellement des formations quaternaires qui couvrent une surface de 20,64 km² (25,7 %) et des marnes et marno-calcaires, couvrant une surface de 20,63 km² soit 25,69% de la surface totale du sous-bassin (Figure 16). Les calcaires gréseux du Crétacé occupent une surface de 10,44 km² (12,99%), formation argilo-gypso-gréseuse et calcaire du Trias occupe une surface de 10,41 km² (12,96%), les grès d'Oligocène (11,11 km²) ; marnes, grès et conglomérat du Miocène occupent une faible surface de 4,39 km² (5,46%). Les argiles, grès, marnes argileuses et les conglomérats du Pliocène n'occupent que 2,71 km² (3,37%) de la surface totale du terrain.

Les formations fortement érodables dont les marnes et marno-calcaires se rencontrent essentiellement dans la partie Sud et la partie Ouest et Sud-Ouest du sous-bassin versant. Les argiles, grès argileuse et conglomérat, occupent une très faible surface et se localisent dans la partie nord du bassin (Tableau 7), tandis que les roches les plus résistantes à l'érosion sont généralement les grès et les calcaires.

Tableau 7. Répartitions des formations lithologiques des sous-bassin versants.

Lithologie	Oued Rhirane		Oued Melah		Oued Bouzerag	
	S (km ²)	S (%)	S (km ²)	S (%)	S (km ²)	S (%)
Formation argilo-gypso-gréseuse, calcaire (Trias)	10,41	12,96	8,76	22,12	15,25	50,97
Marnes, grès et conglomérats (Miocène)	4,39	5,46	-	-	-	-
Grès	11,11	13,83	-	-	-	-
Calcaires, calcaires gréseux (Crétacés)	10,44	12,99	-	-	-	-
Formations quaternaires	20,64	25,70	0,21	0,53	4,02	13,44
Argiles, grès, marnes argileuse et conglomérats (Pliocène)	2,71	3,37	-	-	-	-
Marnes et marno-calcaires	20,63	25,69	-	-	-	-
Calcaire et marno-calcaires (Eocène Inférieur et Moyen)	-	-	3,06	7,73	1,43	4,78
Argile et conglomérats, calcaires lacustres (Mio-Pliocène)	-	-	13,45	33,96	9,22	30,82
Grès et marnes (Miocène Inférieur)	-	-	0,32	0,81	-	-
Grès argileux (Oligocène)	-	-	0,83	2,10	-	-
Marnes et calcaires (Crétacé Supérieur)	-	-	12,97	32,75	-	-
Total	80,36	100	38,19	100	28,83	100

La couverture limitée des calcaires et marnes l'Éocène inférieur et moyen (7,73 %, soit 3,06 km²) est située au sud-ouest pendant, ainsi que la présence de formations gréseuses et marneuses (0,32 km²) et de marnes argileuses (0,83 km²) au milieu du sous-bassin versant (Tableau 7) ; ceci met en évidence la complexité géologique de la région. Elle souligne la nécessité d'une approche détaillée pour comprendre leur rôle dans l'érosion hydrique.

Enfin, bien que couvrant une faible superficie (0,21 km², soit 0,53 %), les formations quaternaires ne doivent pas être négligées en raison de leur susceptibilité à l'érosion, qui peut entraîner des impacts locaux significatifs même sur de petites surfaces.

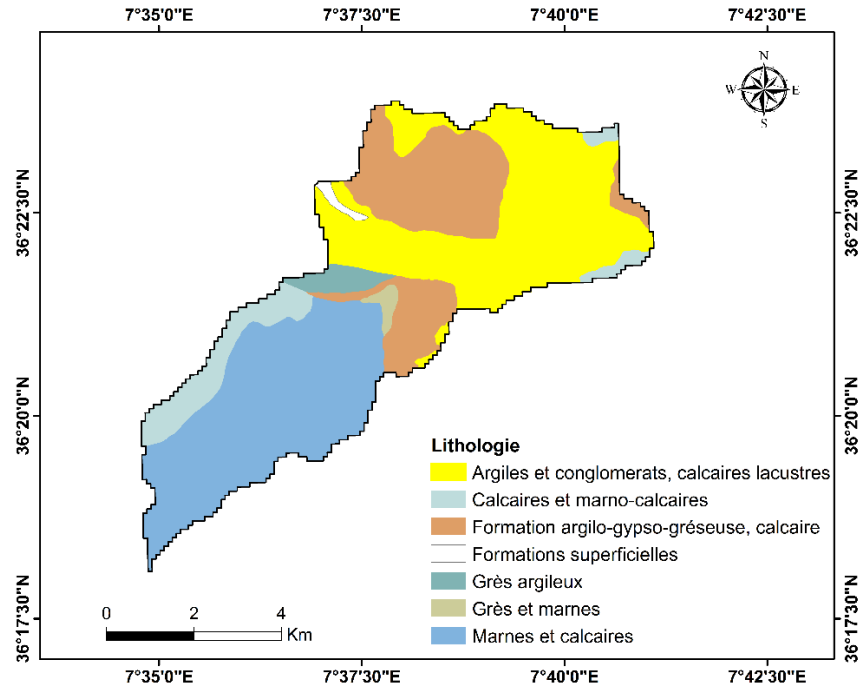


Figure 17. Carte lithologique du sous-bassin versant de l'Oued Melah.

3.3. Sous-bassin versant de l'Oued Bouzerag

Selon la carte lithologique le sous-bassin est principalement constitué de formations argilo-gypseuse gréseuse, calcaire du Trias, occupant $15,25 \text{ km}^2$ soit 50,97% de la surface (Figure 18 et Tableau 7). Elles sont réparties dans presque toute la surface du sous-bassin ; au milieu et dans la partie Sud. Les argiles conglomérats, calcaires lacustres se localisent dans la partie Nord-Est du sous-bassin et occupent une surface de $9,22 \text{ km}^2$.

Vers le nord se rencontre des formations superficielles d'âge quaternaire occupant une faible surface $4,02 \text{ km}^2$ (13,44 %). Les calcaires et marno-calcaires d'âge Eocène inférieur et moyen se localisent au Sud-Oued du sous-bassin et occupent une surface de $1,43 \text{ km}^2$ (4,78 %).

Il est essentiel de bien caractériser la géologie pour évaluer le risque d'érosion hydrique et établir des stratégies durables de gestion des sols et des ressources en eau. Une compréhension globale de la manière dont les différentes formations géologiques interagissent avec les processus hydriques est nécessaire pour prévoir et atténuer les impacts de l'érosion sur le paysage et les infrastructures.

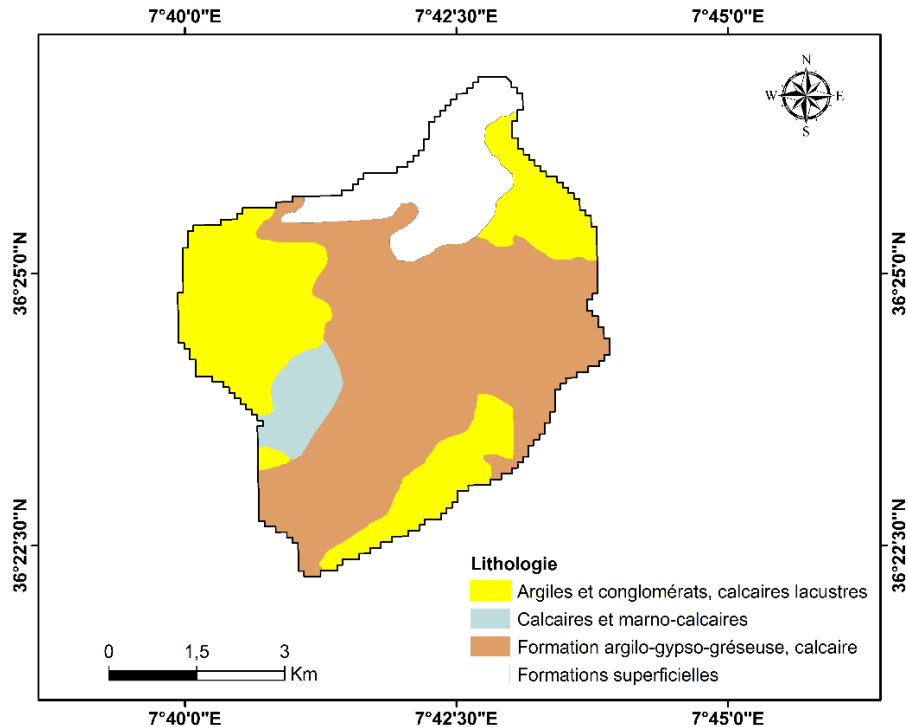


Figure 18. Carte lithologique du sous-bassin versant de l'Oued Bouzerag.

4. Analyse des sols

La composition lithologique, ainsi que les caractéristiques physico-chimiques des matériaux, influencent considérablement les processus d'érosion (Terfous et al., 2001). Un bassin constitué de matériaux meubles très perméables et recouvert d'une végétation continue présente généralement une faible densité de drainage, ce qui permet une meilleure infiltration des eaux de surface. À l'inverse, un bassin constitué de sols érodables, à base de marne et d'argile, et recouvert d'une végétation moyenne, présente souvent une densité de drainage élevée, ce qui entraîne une augmentation du ruissellement des eaux de surface au détriment de l'infiltration.

4.1. Sous-bassin versant de l'Oued Rhirane

La carte des sols illustre une distribution distincte des types de sols dans la zone d'étude, qui montre la présence notable des sols calcaires (Cambisols Calciques Bk), répartis sur toute la surface du sous-bassin et occupant la plus grande surface de 60,21 km² soit 74,92% de la surface du sous-bassin, les sols insaturés (Cambisols Chromiques BC) couvrent une surface de 11,35 km² (14,12%), tandis que les lithosols (I) couvrent une surface de 8,80 km² ou 10,95% de la surface totale (Figure 19 et Tableau 8).

CHAPITRE 2 : Description Du Milieu Physique Des Bassins Versants

Les sols non saturés et les sols calcaires se trouvent souvent dans les zones karstiques où se produit la dissolution du calcaire. Ces sols sont principalement situés dans des régions où le substrat géologique contient une forte proportion de calcaire. En raison de leur faible profondeur et de leur perméabilité variable, ces sols peuvent réagir différemment à l'érosion hydrique par rapport à d'autres types de sols.

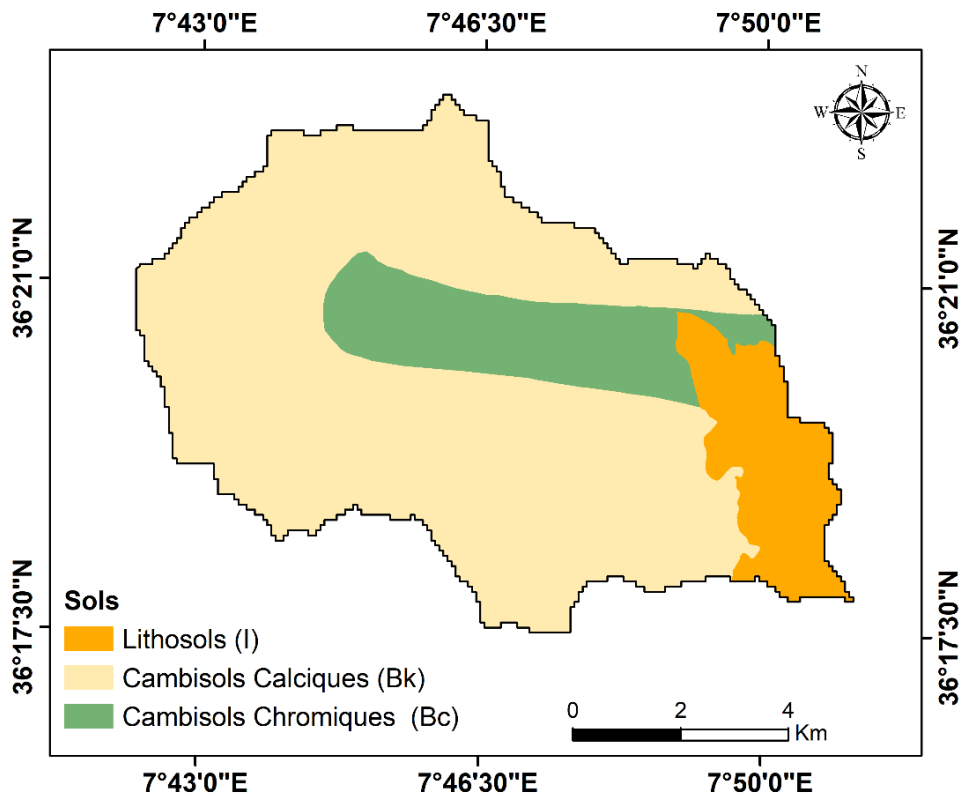


Figure 19. Carte des types de sol du sous-bassin versant de l'Oued Rhirane.

Tableau 8. Répartitions des sols des sous-bassins versants.

Types de Sol	Oued Rhirane		Oued Melah		Oued Bouzerag	
	S (km ²)	S (%)	S (km ²)	S (%)	S (km ²)	S (%)
Cambisols Chromiques (Bc)	11,35	14,12	-	-	-	-
Cambisols Calciques (BK)	60,21	74,92	-	-	-	-
Lithosols	8,80	10,95	-	-	-	-
Calcaire + Solonetz	-	-	1,37	3,46	1,19	3,98
Fluvisols Calcariques	-	-	4,75	11,99	-	-
Vertisols	-	-	5,28	13,33	3,15	10,53
Xérosols Orthiques	-	-	6,31	15,93	12,9	43,13
Luvisols, Sols calcaires	-	-	21,89	55,28	-	-
Xérosols Calciques	-	-	-	-	12,67	42,36
Total	80,36	100	38,19	100	28,83	100

4.2. Sous-bassin versant de l'Oued Melah

A partir de la carte pédologique, on remarque que les luvisols, sont majoritaires dans le sud du terrain puisqu'il occupe une surface de 55,28% de la surface totale du sous-bassin (21,89 km²). Les Luvisols sont généralement bien structurés et souvent riches en calcaire et peuvent offrir une bonne résistance à l'érosion hydrique (Figure 20 et Tableau 8).

Dans la partie nord-ouest du sous-bassin versant, 15,93% (6,31 km²) de la zone est couverte par des Xérosols Orthiques. Ces sols ne retiennent pas bien l'eau et présentent un risque élevé d'érosion hydrique.

En se déplaçant vers le nord-est, 13,33% (5,28 km²) de la zone, on trouve les Vertisols. Ces sols argileux se dilatent et se contractent considérablement en réponse aux cycles d'humidité et sont également sensibles à l'érosion hydrique.

Vers le centre du nord-ouest se rencontre les Fluvisols Calcariques qui occupent une surface de 11,99% (4,75 km²), et enfin les Calcaires + Solonetz qui occupent la plus faible surface de 3,46% (1,37 km²).

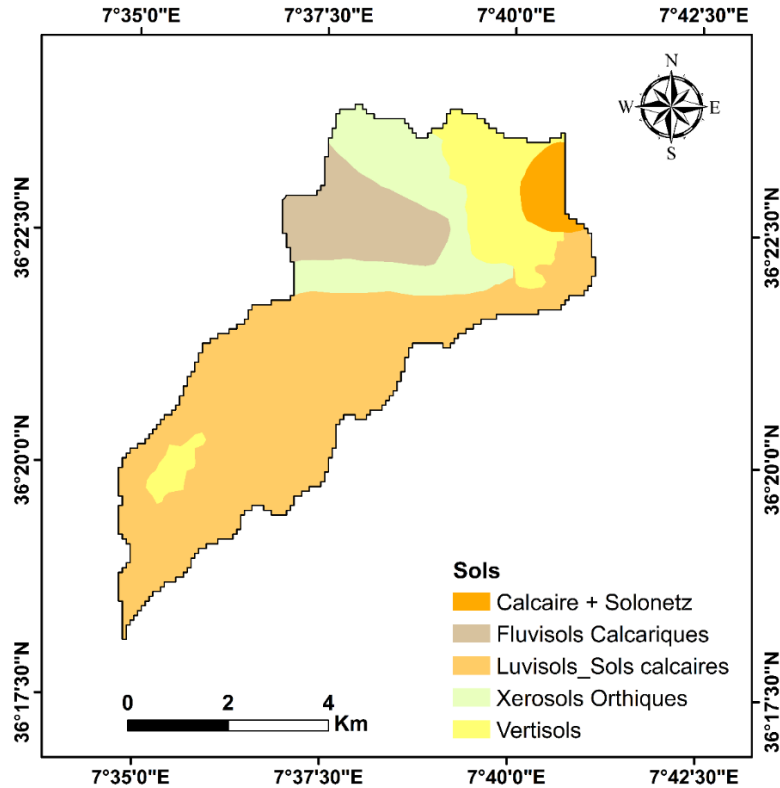
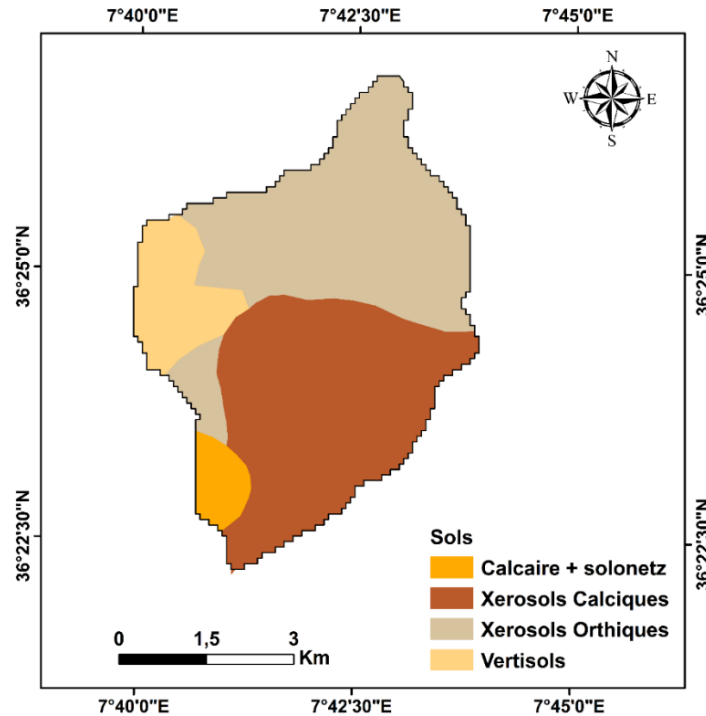


Figure 20. Carte des types de sol du sous-bassin versant de l'Oued Melah.

4.3. Sous-bassin versant de l'Oued Bouzerag

La carte des sols révèle une distribution distinctive des sols dans la région étudiée, mettant en évidence la présence significative de sols Xérosols Orthiques et de Xérosols Calcaiques qui occupent une surface de 43,13 % et 42,36% respectivement, tandis que les Vertisols et les Calcaires + Solonetz, localisés principalement à l'ouest, occupent une faible surface de 10,53 % et 3,98% (Figure 21 et Tableau 8).



5. Analyse des pentes

La cartographie des pentes est un élément essentiel de toute enquête sur l'érosion. Les pentes, qui indiquent la topographie, ont une influence significative sur la détérioration de l'environnement physique et constituent un élément crucial pour l'écoulement de l'eau et l'utilisation des terres.

Par son effet gravitationnel, la pente joue un rôle important dans la dégradation de l'environnement et donne à l'eau une énergie érosive. Sachant que le détachement des particules est inversement proportionnel au carré de la vitesse de l'eau, l'action érosive de l'eau augmente significativement avec la pente. La vitesse de l'eau ruisselante est directement influencée par l'inclinaison de la pente. L'énergie cinétique du ruissellement augmente avec la vitesse de la pente, entraînant le flux de sédiments vers le bas et renforçant l'effet de l'ablation des matériaux détritiques. Par conséquent, avec l'inclinaison de la pente, les pertes de matériaux terribles augmentent de manière exponentielle (Hudson, 1973 ; Wischmeier et Smith, 1978). En outre, la géographie joue un rôle important dans la dégradation des sols et dans l'influence de l'utilisation des terres, en particulier de la couverture végétale.

5.1. Sous-bassin versant de l'Oued Rhirane

Le sous-bassin est caractérisé par un relief hétérogène et accidenté dominé par les pentes fortes (>15%).

La classe des pentes 0 à 5 % occupe une faible superficie de 2,22 km², soit 2,76 % de la surface totale du bassin (Tableau 9). Cette classe est surtout localisée à l'aval du sous-bassin à proximité de l'Oued Rhirane (Figure 22). L'unité morphologique du glacis est visible sur ces pentes. En raison de la faible pente et du bon drainage des formations superficielles, l'érosion est peu active dans la zone où les pentes sont inférieures à 5 %.

Occupant une faible surface de 7,21 km², soit 8,97% de la surface totale du sous-bassin, la classe de 5 à 10 % se localise surtout au nord de la vallée du sous-bassin dans la zone où la plaine est dominante, notamment dans les villages de Dahouara et Oued Cheham.

Tableau 9. Répartition des classes de pentes des sous-bassin versants.

Classes des pentes (%)		Oued Rhirane		Oued Melah		Oued Bouzerag	
		S (km ²)	S (%)	S (km ²)	S (%)	S (km ²)	S (%)
0 - 5	Très faible	2,22	2,76	0,73	1,91	0,71	2,47
5 - 10	Faible	7,21	8,97	2,75	7,21	2,89	10,02
10 - 15	Moyenne	13,72	17,07	6,10	15,98	5,02	17,41
15 - 25	Forte	30,11	37,47	14,61	38,25	11,57	40,13
25	Très forte	27,10	33,72	14,00	36,65	8,64	29,97
Total		80,36	100	38,19	100	28,83	100

Ayant une surface moyenne de 13,72 km², soit 17,07 % de la surface du sous-bassin, la classe des pentes 10 à 15 % (Tableau 7), se localise un peu partout dans le sous-bassin et essentiellement là où se développent les glacis (Figure 22). Ces pentes présentent fréquemment un début de mouvement de masse et une dynamique de ravinement, ainsi qu'un ravinement sur des pentes supérieures à 10 %.

La classe dominante 15 à 25 % occupe surface importante de 30,11 km², soit 37,47% de la superficie du bassin (Tableau 9). Ces pentes se localisent un peu partout dans le sous-bassin et

principalement au centre sur les hauteurs qui dépassent les 450m (Figure 22). Il s'agit des versants bien pentus où l'érosion hydrique est dominante.

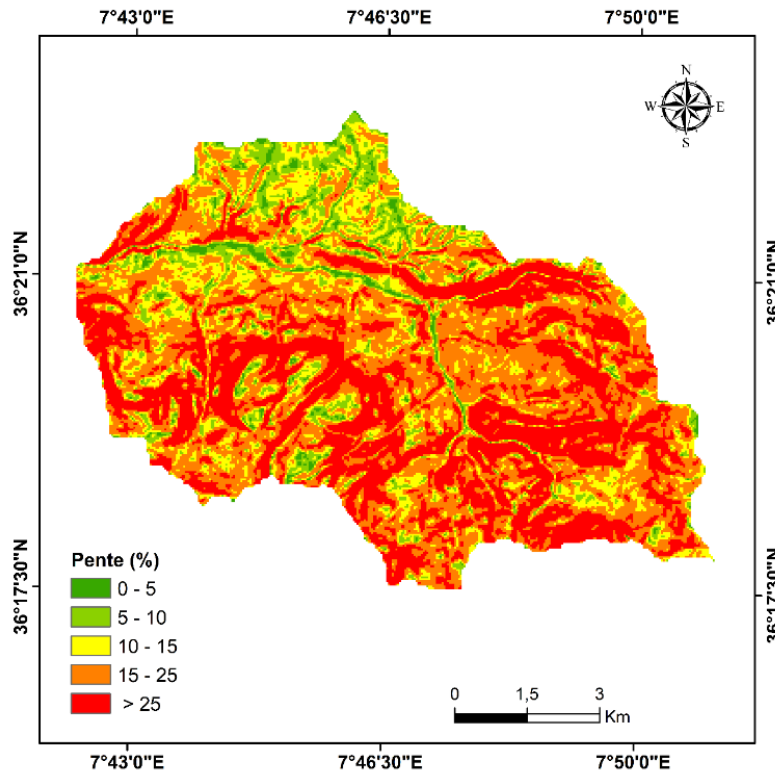


Figure 22. Carte des pentes du sous-bassin versant de l'Oued Rhirane.

Les pentes de la classe supérieure à 25% occupent une surface importante de 27,10 km², soit 33,72% de la surface totale du sous-bassin versant. Cette classe forme les reliefs sous forme de collines et de versants de différents types de roches du grès aux marno-calcaires. Le ravinement est très intense au niveau des versants conglomératiques et argileux très altérés qui forment les versant de ce paysage.

5.2. Les pentes du sous-bassin versant de l'Oued Melah

La classe des pentes 0 à 5 % occupe une très faible surface de 0,73 Km² soit 1,91 % de la surface totale du sous-bassin. Cette classe décrit tous les terrains dont la topographie est plane, localisée généralement à l'aval au niveau de l'oued, des plaines et des plateaux. Elle représente des terrains stables avec un faible risque d'érosion.

Occupant également une faible surface de 2,75, soit 7,21% de la surface du sous-bassin, la classe de 5 à 10 % se localise surtout au nord (Figure 23). Cette classe des pentes est caractérisée

par une topographie vallonnée, sous forme de glacis ou de basses collines. Le risque d'érosion sur ce type de terrain reste faible, bien qu'il puisse être important dans les zones où les activités agricoles et les cultures de céréales qui dominent l'utilisation des terres.

La faible surface (6,10 km², soit 15,98% de la surface du sous-bassin) de la classe 10 à 15 % est répartie sur l'ensemble du sous-bassin. Ces surfaces montrent le développement des glacis et des piémonts. Ces pentes présentent fréquemment un départ de mouvement de masse et une dynamique de ravinement, ainsi qu'un ravinement sur les pentes dont la pente est supérieure à 10%.

En ce qui concerne les pentes de la classe 15 à 25 %, on constate qu'elles sont dominantes et réparties sur l'ensemble du sous-bassin versant, principalement au centre sur des hauteurs supérieures à 450 mètres. La superficie de cette classe est de 14,61 km², soit 38,25% de la superficie du bassin (Tableau 9). Il s'agit de pentes raides avec une prédominance de l'érosion hydrique.

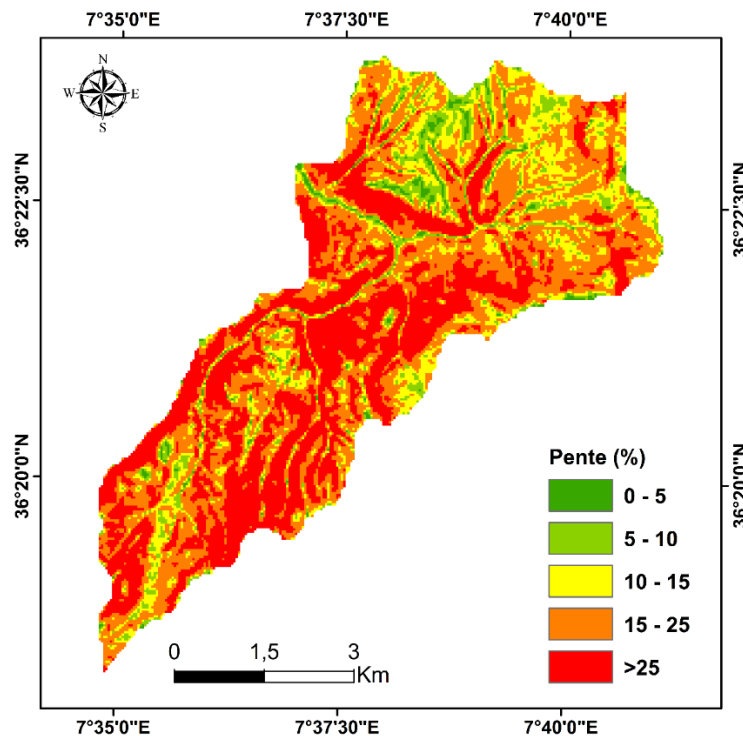


Figure 23. Carte des pentes du sous-bassin versant de l'Oued Melah.

Les pentes supérieures à 25% représentent les hauts piémonts et les zones de montagne de forte pente. Ces zones sont généralement couvertes par la végétation, occupant une surface de 14 km², soit 36,65%.

5.3. Les pentes sous-bassin versant de l'Oued Bouzerag

La classe 0 à 5% est une classe qui occupe une faible surface de 0,71 km² soit 2,47% de la superficie totale du sous-bassin versant (Tableau 9) ; elle se localise au niveau des zones de plaine (Figure 24). Avec une pente faible de 0 à 5 %, les basses pentes sont des terrains qui sont généralement plus résistants au ruissellement de l'eau en raison de leur relief relativement plat. La présence de végétation peut contribuer à préserver la surface du sol et à réduire la probabilité d'une érosion importante du sol.

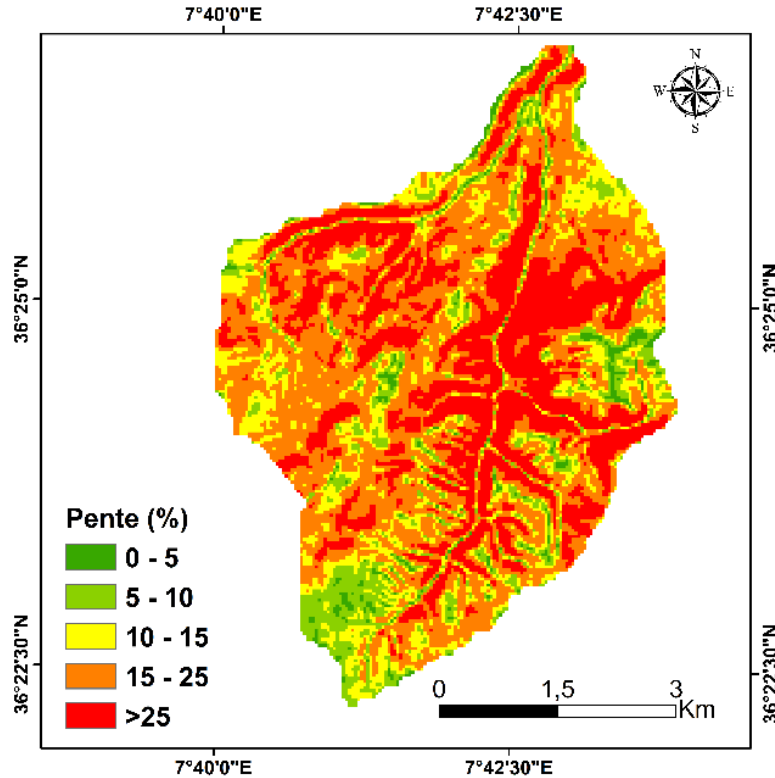
La classe inférieure à 11% (5 à 10 %), occupe une superficie de 2,89 km² soit 10,02% de la surface totale du sous-bassin versant. Elle se localise surtout dans la partie sud du sous-bassin versant à proximité des vallées (Figure 24). Ces pentes comportent l'unité morphologique des glacis souvent polygéniques. Dans cette région l'érosion est peu active à cause de la faible pente et du bon drainage des formations superficielles épaisses. La surface inférieure à 10% représente les glacis qui sont des surfaces morphologiques souvent recouverts par des formations superficielles épaisses.

Les terrains légèrement inclinés sont indiqués par des pentes modérées, qui se situent entre 10 et 15 %. La classe 10-15% représente une faible surface de 5,02 km² soit 17,41 % de la surface totale du bassin versant, se localisant un peu partout dans le sous-bassin. Il ne s'agit pas de pentes particulièrement raides, mais elles peuvent affecter l'écoulement de l'eau et augmenter le ruissellement. À certains endroits, l'érosion hydrique peut avoir un impact plus important, en particulier lorsque des considérations supplémentaires lorsque le type de sol est pris en compte.

La classe 15 à 25% occupe une surface importante 11,57 km² soit 40,13% ; elle se localise surtout sur les versants supérieurs. Ces versants montrent souvent une apparition de la dynamique des mouvements de masse et des ravinements sur des pentes supérieures à 15%. Ces endroits au versants pentus, situés principalement à l'ouest du bassin, sont plus enclins à l'érosion hydrique car le ruissellement est plus rapide et plus difficile à contrôler. Les pratiques de gestion des sols et de la végétation sont de plus en plus essentielles pour réduire les phénomènes d'érosion.

La classe des pentes supérieures à 25% occupe une surface de 8,64 km² soit 29,97% de la surface totale du sous-bassin versant. La zone se caractérise par des pentes raides de plus de 25 %. En raison de la fragilité croissante du sol et du ruissellement excessif, ces versants surplombés par Jbel el Guerain, Koudiat el Fatoudja, sont exposés à un risque important d'érosion hydrique. Il

pourrait être essentiel d'utiliser des techniques de conservation du sol telles que des terrasses ou des murs de protection contre le transport des sols limoneux, et ce afin de réduire les effets de l'érosion.



6. Analyse de la végétation

La couverture végétale joue un rôle crucial dans le contrôle des processus d'érosion, dont l'efficacité varie en fonction de l'utilisation des sols.

La carte d'occupation du sol a été réalisée à l'aide d'une classification supervisée des bandes optiques (1, 2, 3, 4, 5, 6 et 7) d'une image satellitaire Landsat 8, téléchargée depuis l'explorateur terrestre USGS ; cette image a été acquise en 2019. L'utilisation des bandes dans la classification supervisée sous le logiciel ArcGIS a conduit à la sectorisation de plusieurs types d'utilisation des sols.

6.1. Analyse de la végétation de l'Oued Rhirane

La végétation de la région se compose principalement de cultures (31 %) et d'arbustes clairsemés que l'on trouve dans les parties ouest, centrale et nord-est (Figure 25 et Tableau 10). Les prairies recouvrent les sols sous la forme d'une couverture végétale clairsemée sur les pentes abruptes où sont transformées en terres agricoles.

Le nord, le sud et le centre du sous-bassin versant se distinguent par une grande superficie de terres agricoles (38,60 %). Vers le sud et le sud-ouest, il y a des prairies dégradées qui couvrent une superficie de (14,61%).

Le sud-est est occupé en grande partie par des prairies (17,90%), des roches nues en pentes raides (7,79%) et une forêt arbustive dégradée par les feux d'été (10,14%) ; alors que la forêt arbustive ne représente que 9,15%.

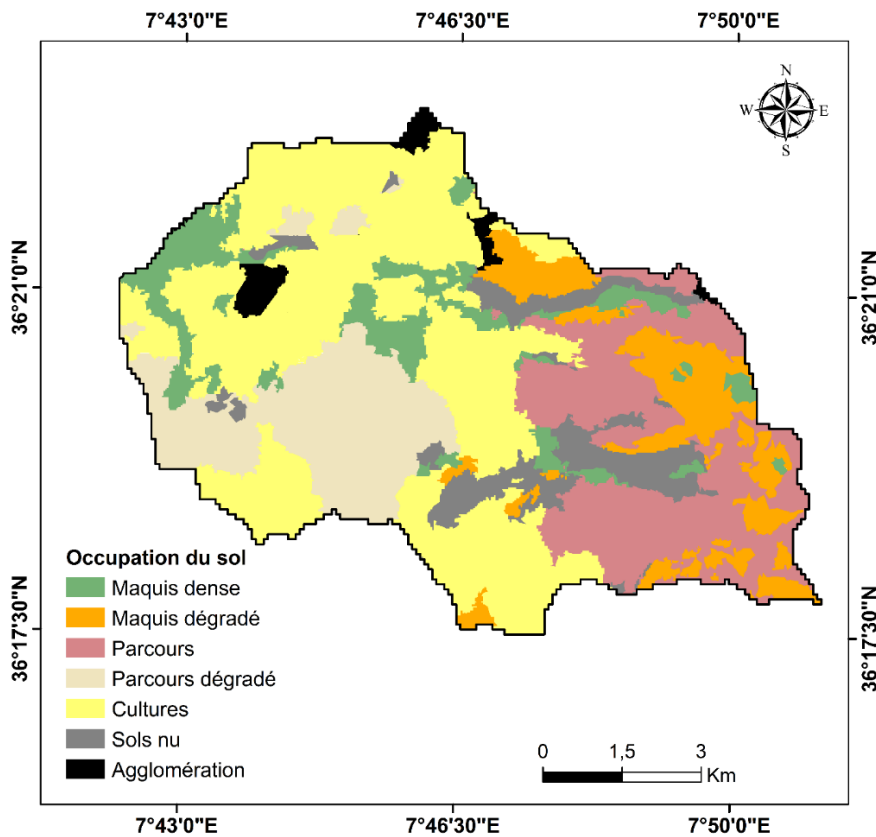


Figure 25. Occupation du sol du sous-bassin versant de l'Oued Rhirane.

Tableau 10. Répartition de la végétation dans les sous-bassins étudiés.

Occupation des sols	Oued Rhirane		Oued Bouzerag		Oued Melah	
	S (km ²)	S (%)	S (km ²)	S (%)	S (km ²)	S (%)
Maquis dégradé et parcours			8,47	28,33	4,28	10,81
Maquis clair	8,14	10,14	2,79	9,33		
Maquis dense	7,35	9,15	9,72	32,51	10,41	26,28
Parcours	14,38	17,90	-	-	-	-
Parcours dégradés	12,02	14,97	-	-	-	-
Cultures	31,00	38,61	8,92	29,83	23,84	60,19
Sol nus	5,96	7,43	-	-	1,08	2,73
Agglomération	1,45	1,80	-	-	-	-
Total	80,30	100	29,90	100	39,61	100

6.2. Analyse de la végétation du sous-bassin de l'Oued Melah

La carte de la végétation montre une distribution variée des terres dans la zone d'étude. Les maquis couvrent une surface de 26,28 % de la zone et sont situées au nord, au centre et au sud du sous-bassin versant (Figure 26). Le sol nu, qui représente 2,73 %, indique des zones où la végétation est absente, probablement des sols érodés.

Les maquis dégradés et les parcours représentent 10,81 % du territoire, trouvés principalement dans le nord-ouest et une petite partie dans le sud-ouest du sous-bassin, soulignant les zones où la végétation d'origine a été altérée par les activités humaines ou les conditions climatiques.

Enfin, les cultures dominent avec une proportion de 60,19 %, ce qui indique une utilisation intensive des terres pour l'agriculture. Cette répartition diversifiée met en évidence l'interaction complexe entre l'homme et son environnement naturel dans cette région.

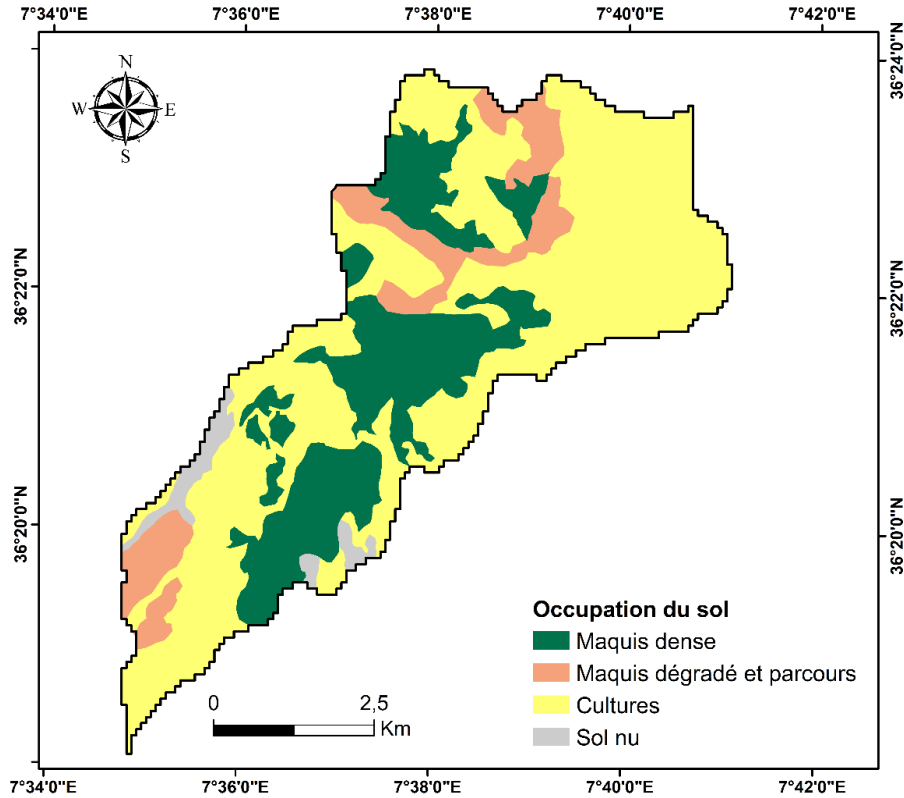


Figure 26. Occupation du sol du sous-bassin versant de l’Oued Melah.

6.3. Analyse de la végétation de l’oued Bouzerag

La carte de la végétation du sous-bassin montre différents types d’occupation du sol. Dans la partie orientale du sous-bassin, on trouve un maquis dense qui couvre 9,72 km², soit 32,51 % de la superficie (Figure 27 et Tableau 10). Le maquis dense est important pour la prévention de l’érosion car sa couverture végétale épaisse et continue stabilise le sol et réduit le ruissellement.

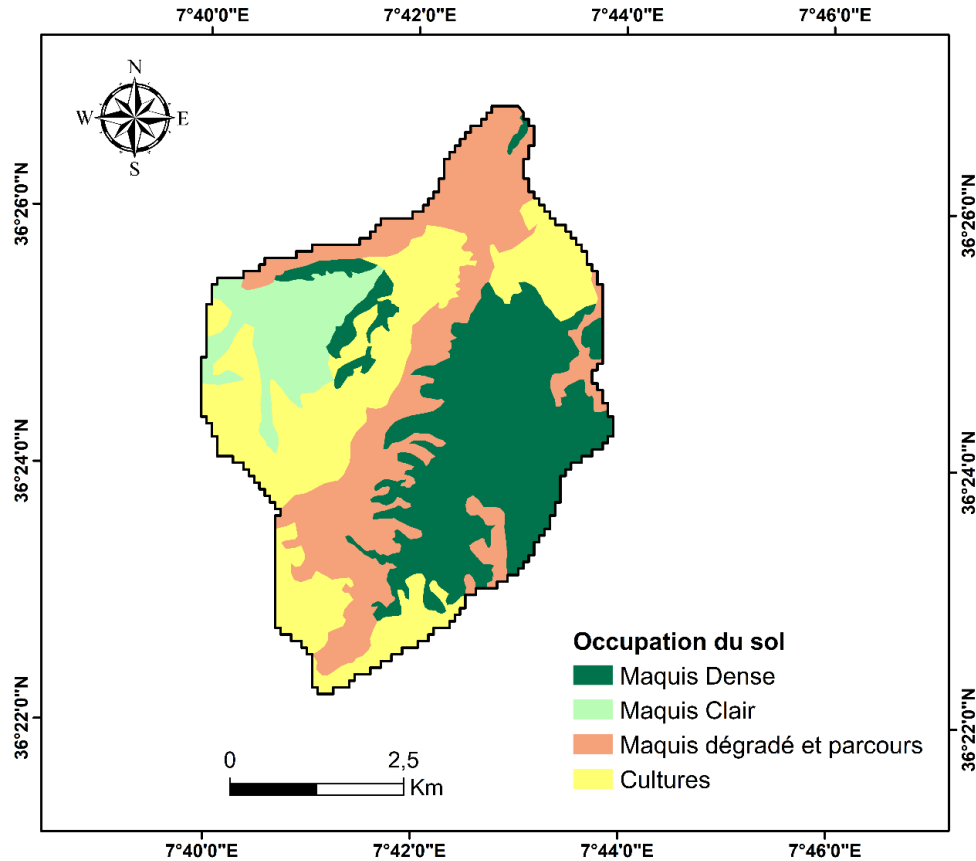


Figure 27. Occupation du sol du sous-bassin versant de l'Oued Bouzerag.

Les maquis dégradés et les parcours se rencontrent au nord du sous-bassin versant, au centre et en faible partie vers le sud du sous-bassin, qui couvrent une surface de 8,47 km² soit 28,33% de la surface du sous-bassin (Figure 27). Cette zone, souvent marquée par une couverture végétale clairsemée en raison de la dégradation due au surpâturage, à l'exploitation excessive, est particulièrement vulnérable à l'érosion hydrique.

Les maquis clairs représentent 9,33% de la surface et se localisent dans la partie ouest du sous-bassin versant. Il offre une protection modérée contre l'érosion mais ils ne sont pas suffisants pour empêcher le ruissellement et la perte de sol lors de fortes pluies.

Enfin, les cultures couvrant une grande superficie de 29,83%, montrent généralement une utilisation intensive du sol pour l'agriculture, ce qui accroît le risque d'érosion lorsque le sol est laissé nu pendant des périodes estivales et automnales.

Conclusion

En résumé, la zone d'étude présente une série de caractéristiques topographiques et environnementales qui ont un impact important sur les processus d'érosion. La situation géographique de la région et les précipitations révèlent une grande variété de régimes hydro-climatiques, qui sont des facteurs importants qui influencent la fréquence et l'intensité du phénomène d'érosion.

L'analyse des pentes révèle une topographie variée où certaines régions présentent des pentes fortes qui peuvent rendre la zone plus vulnérable à l'érosion par ruissellement et ravinement. Entre autres, la résistance du sol à l'érosion est directement influencée par la lithologie de la région, qui est principalement composée de plusieurs formations géologiques allant du Quaternaire au Trias.

Les différents types de sol nécessitent des approches de gestion distinctes car ils ont une capacité différente à résister aux forces érosives en raison des différences de texture et de structure du sol. L'occupation des sols, qui comprend les cultures en dominance, les maquis et les parcours souvent clairsemés avec une exploitation excessive des sols peut modifier la dynamique des processus d'érosion. En raison de la diminution de la couverture végétale et de la perturbation des sols, les zones agricoles et urbaines sont particulièrement vulnérables.

CHAPITRE 03 :

Matériels et Méthodes

Introduction

Dans ce chapitre, nous décrivons la méthodologie utilisée pour analyser l'érodabilité et l'estimation de l'érosion des sols à l'échelle spatiale dans les sous-bassins versants de notre étude. Nous avons commencé par définir les objectifs spécifiques de notre recherche par l'élaboration d'un plan d'échantillonnage adapté aux caractéristiques des sites étudiés. Des échantillons de sol ont été prélevés sur le terrain, accompagnés d'observations directes pour compléter les données quantitatives. Ces échantillons ont ensuite été analysés au laboratoire afin de mesurer les différents paramètres physico-chimiques tels que le pH, la conductivité, l'humidité hygroscopique, la matière organique et la taille des particules. Les données obtenues ont été soumises à des analyses statistiques et géostatistiques afin d'évaluer leur variabilité spatiale.

Ces approches vont nous permettre d'acquérir une compréhension détaillée du phénomène de l'érosion hydrique dans les sols et d'identifier les zones les plus sensibles à l'érosion.

1. Méthodes d'échantillonnage

À l'aide du Modèle Numérique d'Élévation (MNE) de la zone d'étude, nous avons délimité trois sous-bassins versants à l'aide du logiciel WMS. La forme vectorielle résultante a été exportée vers Global Mapper, ce qui nous a permis d'établir une grille de notre zone d'étude.

Pour la méthode d'échantillonnage, nous avons choisi un échantillonnage systématique. Nous avons établi une grille sur le logiciel Global Mapper et identifié le centre de chaque carré comme point d'échantillonnage. La distance entre ces points est d'environ 740 mètres dans la direction de la longitude et 750 mètres dans la direction de la latitude. Chaque point a été numéroté et déterminé par ses coordonnées géographiques. Nous avons ensuite saisi ces points dans un GPS (Garmin) pour les localiser directement sur le terrain. En outre, nous avons exporté ces points directement vers Google Earth au format KML/KMZ pour faciliter l'orientation et la localisation sur le terrain.

2. Prospection sur terrain

Cette étude a consisté à collecter des échantillons de sol à l'aide d'un GPS (GARMIN). À chaque point d'échantillonnage localisé sur GPS (Figure 28), nous avons inspecté visuellement

l'environnement, y compris la végétation, le type de roche et l'utilisation des terres. Nous avons ensuite prélevé un échantillon de sol d'environ 500 g à chaque point, à une profondeur de 20 cm.



Figure 28. Echantillonnage sur terrain d'étude à l'aide d'un GPS.

3. Analyses physico-chimiques des échantillons au laboratoire

Les échantillons collectés de la zone d'étude ont été séchés pendant quelques jours à température ambiante (Figures 29 et 30), puis broyés et tamisés à travers un tamis à mailles de 2 mm avant d'être stockés dans des sacs en plastique en vue d'une analyse ultérieure.



Figure 29. Echantillons séchés et conservés dans des sacs en plastique.



Figure 30. Tamisage des échantillons collecté.

3.1. Le potentiel hydrogène (pH)

Le test de pH est couramment utilisé pour déterminer l'acidité ou la basicité d'une solution en mesurant la concentration des ions H^+ dissociés. En science du sol, l'analyse du pH est importante car elle affecte de manière significative la productivité du sol et d'autres propriétés. Elle fournit des informations précieuses sur la capacité du sol à échanger des cations, sur la concentration des cations assimilables et sur l'activité biologique. En outre, il peut contribuer à la gestion des sols et influencer sur l'adsorption/désorption des polluants organiques, des pesticides et des métaux lourds.

Tableau 11. Les valeurs référence du Ph du sol.

pH	Désignation
<4,5	Extrêmement acide
4,5-5	Très fortement acide
5,1-5,5	Fortement acide
5.6-6	Moyennement acide
6,1-6,5	Légèrement acide
6.6-7,3	Neutre
7,4-7,8	Moyennement basique
7,9-8,4	Basique
8,5-9	Légèrement alcalin
9.1-10	Alcalin
>10,0	Fortement alcalin

Le pH du sol peut varier de 3 à 9 et est influencé par divers facteurs, notamment la nature et la concentration des minéraux, ainsi que la lithologie, la topographie, le climat et l'activité biologique. Les différents niveaux de classification de l'acidité des sols selon l'USDA (1971) sont présentés dans le tableau 11.

3.1.1 Détermination du pH-H₂O

La mesure du pH est généralement considérée comme l'une des analyses les plus simples et les plus faciles à réaliser. En général, la mesure du pH dans les liquides est effectuée sur place à l'aide d'un pH-mètre. Cependant, lorsqu'il s'agit de matériaux solides, des étapes préparatoires sont nécessaires pour la détermination du pH.

Mode opératoire :

1. Prendre 5 grammes de sol séché, passer au tamis de 2 mm, et placer le contenu dans une fiole.
2. Ajouter 25 cm³ d'eau distillée dans le ballon et agiter doucement sur un agitateur automatique pendant 1 heure jusqu'à l'obtention d'un mélange uniforme.
3. Laisser reposer la solution pendant 30 minutes avant de mesurer le pH à l'aide d'un pH-mètre.

3.1.2. Détermination du pH-KCl

Le pH-KCl mesure l'acidité d'échange ou l'acidité potentielle. Il indique le degré de saturation du complexe absorbant et la nature chimique des ions fixés. Dans notre étude, nous avons mesuré l'acidité d'une suspension de chlorure de potassium en utilisant un rapport sol/solution normalisé de 1/5.

3.2. La conductivité électrique du sol

La mesure de la conductivité électrique est aussi importante que le test de pH, car elle évalue la capacité d'un matériau ou d'une solution à conduire un courant électrique. Elle est influencée par la salinité et la concentration minérale de la solution. La conductivité du sol est également influencée par divers facteurs tels que la texture, la capacité d'échange cationique, la teneur en matière organique, la transformation et le type de roche présent.

3.3. La matière organique

La quantité de matière organique dans le sol est mesurée en déterminant le carbone organique à l'aide de la méthode Anne. Cette méthode consiste à oxyder la matière organique avec un mélange de bichromate de potassium et d'acide sulfurique. On suppose que la quantité d'oxygène consommée est proportionnelle au carbone présent. L'excès de bichromate non utilisé dans la réaction est ensuite déterminé par titrimétrie à l'aide du sel de Mohr. Enfin, cette valeur est multipliée par le coefficient 2.

Dans la méthode Anne, l'oxydation est effectuée à haute température, au point d'ébullition pour que l'oxydation soit complète, un temps d'ébullition de 5 minutes est nécessaire.

D'autre part le rapport

$$\frac{\text{CrO}_3 \text{ consommé}}{\text{CrO}_3 \text{ introduit}} \times 100 \text{ doit être compris entre } 20 \% \text{ et } 60 \%$$

Le dosage du carbone organique est effectué en utilisant 10 ml de solution de bichromate de potassium à 8 % et 15 ml d'acide sulfurique concentré à 98 %, avec un échantillon de sol qui ne doit pas dépasser 30 mg de carbone (Figure 31).



Figure 31. Détermination du carbone organique.

3.4. La texture du sol (Granulométrie)

La granulométrie est un paramètre qui décrit la texture du sol. Elle fournit des informations sur la taille et le pourcentage des particules de sol inférieures à 2 mm (minérales et organiques) et sur leur distribution. Les particules de sol sont classées en groupes texturaux selon les classes texturales de l'USDA-FAO (FAO, 2009). Cette classification comprend le sable (2 mm à 0,05 mm), le limon fin (2 à 20 μm), le limon grossier (20 à 50 μm), le sable fin (50 à 200 μm) et le sable grossier (200 μm à 2 mm). La granulométrie donne des indications sur l'aération, la porosité, la fertilité et le taux de drainage du sol. Elle aide également à identifier le type de sol et fournit des informations importantes sur la capacité d'agrégation, la disponibilité de l'air et de l'eau, la teneur en nutriments et l'intensité de la capillarité.

Le protocole de granulométrie (méthode internationale) est utilisé pour déterminer la texture des échantillons, également connu sous le nom de la méthode Robinson (Figure 32).

Mode opératoire :

1. Préparer 10 grammes de sol dans un erlenmeyer.
2. Ajouter 15 ml de peroxyde d'hydrogène à l'échantillon de sol jusqu'à ce que la réaction s'arrête (une effervescence peut se produire).
3. Ajouter 15 à 25 ml de HCl 10 % au sol jusqu'à ce que la réaction s'arrête (effervescence possible).
4. Transférer le contenu de l'erlenmeyer dans une bouteille de 1000 ml.
5. Ajouter 5 ml de NaOH ou d'hexamétaphosphate.
6. Agiter la bouteille sur un agitateur rotatif pendant 2 heures.
7. Transférer le contenu de la bouteille dans une éprouvette de 1000 ml, remplir d'eau distillée, mélanger et laisser reposer.
8. Au bout de 6 heures, prélever à l'aide d'une pipette Robinson à une profondeur liée à la température du milieu pour déterminer les argiles.
9. Mélanger à nouveau pendant un temps lié la température, puis prélever avec la pipette Robinson à une profondeur liée à la température du milieu pour déterminer les argiles + les limons.
10. Le reste de l'échantillon est tamisé sur un tamis de 50 μm de diamètre pour déterminer les sables.

Par le biais de cette opération, on fait ressortir la texture des échantillons en utilisant le triangle textural.



Figure 32. Photos montrant les étapes du protocole de la granulométrie.

3.5. La structure du sol

Le terme « structure du sol » fait référence à la manière dont les particules minérales tels que le sable, le limon et l'argile sont disposées et organisées en agrégats. Ces structures affectent les propriétés physiques et fonctionnelles du sol. Leur formation est influencée par des facteurs telles que l'activité biologique, la matière organique et les conditions environnementales. Une structure de sol bien développée favorise la circulation de l'air et de l'eau, réduit le risque de compactage et favorise la croissance des plantes.

4. Analyse géostatistique

La corrélation spatiale entre les points de données observés peut être exprimée à l'aide d'un modèle mathématique appelé « variogramme ». Le semi-variogramme, un type spécifique de variogramme, est utilisé pour analyser la corrélation spatiale entre les points de données observés. Il est particulièrement utile pour comprendre l'érodabilité du sol et sa relation avec les conditions géomorphologiques. Diverses méthodes géostatistiques sont utilisées pour obtenir le modèle le plus précis. Le semi-variogramme quantifie l'incohérence spatiale et représente la variabilité moyenne

quadratique entre les lieux d'échantillonnage voisins à une distance h , comme l'exprime l'équation suivante (Bhunja et al., 2018) :

$$\gamma (h) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2$$

Considérons (x_i) et (x_i+h) comme des points d'échantillonnage séparés par une distance h . Soit $Z(x_i)$ et $Z(x_i + h)$ les valeurs mesurées de la variable Z en ces points. Le semi-variogramme expérimental $\gamma (h)$ est ensuite comparé à un modèle théorique, telles que les fonctions sphériques, exponentielles, linéaires ou gaussiennes, afin de déterminer trois paramètres principaux du semi-variogramme : la pépité (c_0), le seuil (c_0+c) et l'étendue (r) (Figure 33).

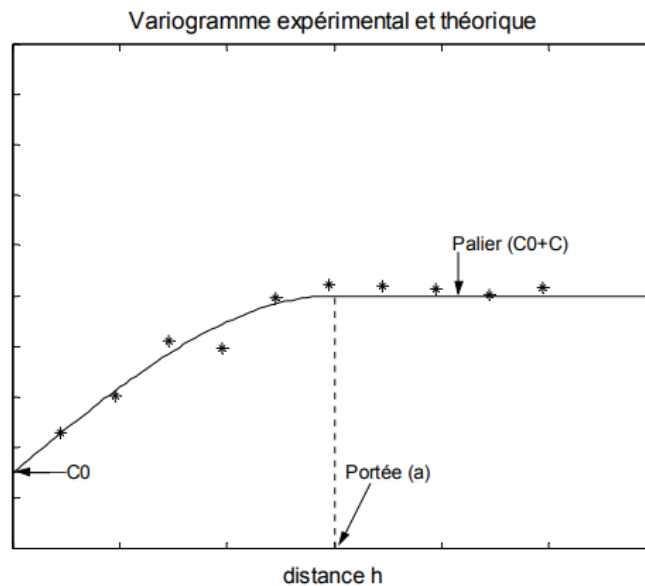


Figure 33. Présentation d'un semi-variogramme.

En observant le modèle de semi-variogramme de la figure, il devient évident que le modèle se stabilise à une distance particulière, connue sous le nom de plateau. Les points d'échantillonnage qui sont séparés par une distance inférieure à l'intervalle présentent une autocorrélation spatiale, alors que les points séparés par une distance supérieure à l'intervalle n'en présentent pas.

La fonction analyse la différence entre des points de données proches pour déterminer s'ils contiennent des informations similaires. Les données sur le sol présentent généralement une autocorrélation spatiale. La semi-variance augmente avec la distance entre les observations. Dans la figure 33, quelques points noirs résument la structure spatiale du jeu de données. Le variogramme

suppose une stationnarité de second ordre et fournit des paramètres pour décrire la structure spatiale du terrain.

Lors du calcul du variogramme expérimental, il est nécessaire d'ajuster un modèle théorique afin d'extrapoler et d'estimer les variables aux points non échantillonnés. La méthode de krigeage a été utilisée pour l'interpolation spatiale et la création de la carte spatiale du facteur K. Le krigeage ordinaire a été choisi pour cette analyse en raison de l'espérance mathématique inconnue de la variable régionalisée $Z^*(x)$. Il est considéré comme l'une des techniques d'interpolation les plus précises, car il part du principe que les variables proches dans l'espace sont plus similaires que celles qui sont plus éloignées (Kavianpoor et al., 2012).

Dans le calcul des valeurs expérimentales du semi-variogramme, le maximum a été fixé à la moitié de l'étendue de la zone d'échantillonnage. Les valeurs expérimentales calculées du semi-variogramme ont ensuite été ajustées dans la sphère lors de la méthode des moindres carrés pondérés et peuvent être définies par l'équation suivante :

$$\begin{aligned} \gamma(h) &= c_0 + c \left(\frac{3h}{2r} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{r} \right)^3 \right) \text{ pour } 0 < h \leq r \\ &= c_0 + c \text{ for } h > r \\ &= 0 \text{ for } h = 0 \end{aligned}$$

La distance de décalage est notée $h = |h|$, avec les paramètres c_0 pour la variance des pépites, c pour la variance spatialement corrélée (variance de seuil) et r pour l'étendue du paramètre de distance. La somme de c_0 et de c permet d'estimer la variance du processus aléatoire, connue sous le nom de « seuil partiel ». La variance, c_0 , représente la variation non corrélée à l'échelle, y compris l'erreur de mesure, tandis que c représente la composante corrélée de la variation pour la continuité (Khanchoul et Boubheziz, 2019).

Un aspect important de l'analyse variographique est la sélection de la distance de décalage totale pour adapter le variogramme aux données expérimentales. Si la taille du décalage est trop grande, l'autocorrélation à courte distance peut être masquée. Inversement, si la taille du décalage est trop petite, il peut y avoir de nombreuses cases vides et la taille des échantillons dans les cases sera trop petite pour obtenir des moyennes représentatives. La distance de séparation est choisie sur la base du critère selon lequel 95 % des paires doivent avoir été utilisées pour l'ajustement du

modèle de variogramme. L'élimination des paires de données à une distance de séparation plus grande pourrait améliorer de manière significative l'ajustement du modèle de variogramme aux données d'érodibilité du sol dans le bassin étudié (Khanchoul et Boubehziz, 2019 ; Lakhankar et al., 2010).

5. Analyses statistiques

Dans notre recherche, nous avons utilisé la méthode de krigeage ordinaire (OK) pour étudier la variabilité spatiale de divers paramètres physico-chimiques. Le krigeage ordinaire est une technique géostatistique qui permet de prédire des valeurs inconnues à partir de données échantillonnées en utilisant des fonctions de covariance spatiale. Cette méthode permet d'estimer la distribution de variables continues sur des surfaces géographiques, fournissant ainsi des prédictions plus précises basées sur les observations disponibles.

Les méthodes géostatistiques conventionnelles, y compris le krigeage ordinaire, reposent souvent sur l'hypothèse que les données suivent une distribution normale. Cette hypothèse est cruciale car elle a un impact sur l'estimation et l'utilisation des paramètres de covariance pour la prévision spatiale (Webster, 2001). Pour valider cette hypothèse, nous avons effectué un test de Kolmogorov-Smirnov (K-S). Ce test statistique compare la distribution des données observées avec une distribution normale théorique, en évaluant si les disparités entre les deux distributions sont significatives. Grâce à ce test, nous avons pu déterminer si les données de notre étude respectaient l'hypothèse de normalité nécessaire à l'application fiable du krigeage ordinaire.

Les données sur le sol ont été analysées à l'aide de statistiques descriptives et la méthode de Tukey a été utilisée pour examiner la dispersion des quartiles et identifier les valeurs aberrantes.

Pour évaluer la relation entre la valeur K et divers facteurs tels que le type de sol, la matière organique, la structure du sol et la perméabilité du sol, une ANOVA (analyse de la variance) à sens unique a été réalisée. Le test de Fisher (distribution F) a été utilisé pour déterminer si la variable qualitative « type de sol » a un impact sur les variables quantitatives. Le niveau de signification a été fixé à 5%. Le programme XLSTAT 2018 a été utilisé pour ces calculs.

Nous avons utilisé la distribution F comme distribution d'échantillonnage et fixé des valeurs critiques pour tester les hypothèses. L'hypothèse nulle a été testée pour déterminer si les moyennes

et les variances des échantillons sont égales. Si l'hypothèse nulle est rejetée, cela signifie que les différences observées ne sont pas le fruit du hasard.

Le test ANOVA comporte plusieurs étapes, y compris des calculs et des équations spécifiques.

$$sb^2 = \frac{\sum_1^c ni (\bar{y}_i - \bar{y})^2}{c - 1}$$

où :

- Sb^2 est la somme des différences entre les sols individuels et la moyenne de chaque groupe.
- i est le numéro du groupe.
- ni est la taille de l'échantillon du groupe ii .
- \bar{y}_i est la moyenne du groupe ii .
- \bar{y} est la moyenne globale de toutes les observations.
- c est le nombre total de groupes.

La deuxième équation est la variance intra-groupe :

$$sw^2 = \frac{\sum_1^c \sum_i^{ni} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2}{N - c}$$

où :

- La somme de y_{ij} représente les valeurs des observations à l'intérieur et entre les groupes.
- N est le nombre total d'observations.
- c est le nombre total de groupes.

Ensuite, nous avons calculé la valeur observée de la distribution F comme suit :

$$Fobs = \frac{Sb^2}{Sw^2}$$

Après avoir effectué tous les calculs, nous déterminons le F^* critique à partir de la table de distribution F avec un niveau de signification de $\alpha=0,05$. Les degrés de liberté étaient les suivants : df (numérateur) = $c-1=2$; df (dénominateur) = $N-c=129$. En utilisant ces valeurs, nous lisons le F^* du tableau de distribution F, et le résultat est précisément égal à 3,07.

Si $F_{obs} > F^*$, nous rejetons l'hypothèse nulle selon laquelle il n'y a pas de différence entre les types de sol. Si $F_{obs} < F^*$, nous ne rejetons pas l'hypothèse nulle, mais nous déclarons que l'échantillon n'est pas significatif pour détecter une relation entre les variables.

6. Analyse morphométrique

L'analyse des paramètres morphométriques joue un rôle crucial dans la compréhension et la gestion des bassins versants, ce qui fait d'elle une composante fondamentale des investigations de l'érosion. Ainsi, Il est important d'évaluer les paramètres morphométriques, en mettant l'accent sur l'évaluation des paramètres de relief (intégrale et courbe hypsométrique), linéaires et surfaciques des bassins (superficie, densité de drainage et fréquence des talwegs). Les bassins étudiés ont été subdivisés en sous-bassins afin de détecter les zones sensibles à l'érosion hydrique et principalement au ravinement.

6.1. Relation de surface

Le dimensionnement des surfaces est simplement le résultat de mesures linéaires, et les composantes de surface utilisées ici font donc partie de la morphométrie statistiquement exploitable. La caractéristique essentielle des composantes de surface est la surface comprise dans le bassin d'un ordre donné (A_0). La surface est très importante en termes de géomorphologie des bassins.

6.1.1. Densité de drainage

La densité de drainage est définie par la formule :

$$Dd = \frac{\sum Li}{A}$$

Où :

- Dd : Densité de drainage (km^{-1})
- Li : Longueur de tous les talwegs du bassin ou sous-bassin (km)
- A : Surface du bassin ou sous-bassin (km^2)

La densité du drainage est principalement influencée par la géologie (la nature des roches) et par la perméabilité du sol. Elle reflète la nature du ruissellement de surface, la stabilité du réseau de drainage et le comportement du bassin versant.

Les zones présentant des substrats résistants ou des capacités d'infiltration élevées ont généralement des cours d'eau très espacés, ce qui se traduit par une faible densité de drainage. Lorsque la résistance ou la perméabilité de la surface diminue, le ruissellement augmente, ce qui se traduit par des cours d'eau plus rapprochés et une densité de drainage plus élevée. En outre, l'abondance des précipitations détermine la régularité ou l'intermittence des cours d'eau.

6.1.2. Fréquence des talwegs

La classification de Strahler a été utilisée pour mesurer la ramification du réseau hydrographique des bassins versants, qui consiste à catégoriser les cours d'eau de même ordre n . La confluence de deux cours d'eau de même ordre donne un cours d'eau d'ordre $n+1$, tandis qu'un cours d'eau recevant un affluent d'ordre inférieur conserve son ordre.

Il s'agit du rapport entre le nombre de talwegs d'ordre 1 et la surface du bassin. C'est manifestement un paramètre qui rend compte d'un effet de densité en nombre, probablement similaire à l'effet de densité en longueur représenté par Dd . Ce paramètre morphométrique permet de mieux expliquer l'intensité de l'érosion linéaire car il est en relation directe avec la structure géologique de la formation géologique existante (fractures et failles).

Il est défini par la formule suivante :

$$F = \frac{N_x}{A}$$

Avec :

- N_x : nombre des talwegs d'ordre 1
- A : la surface (km^2)

6.2. Relation de relief

6.2.1. Hypsométrie

Les informations recueillies de la carte altimétrique, de la courbe hypsométrique et l'intégrale hypsométrique (HI) sont utilisées pour analyser les différents stades d'évolution du relief. Cette dernière permet de déterminer la masse du relief qui n'a pas encore été consommée par l'érosion.

Ainsi, la formule suivante de Pike et Wilson (1971) est utilisée pour définir l'intégrale hypsométrique :

$$H = \frac{H \text{ moy} - H \text{ min}}{H \text{ max} - H \text{ min}} \times 100$$

H moy, H max et H min sont respectivement l'altitude moyenne, l'altitude maximum et l'altitude minimum.

On désigne une courbe hypsométrique ayant une forme convexo-concave et une Valeur de RRI'intégrale hypsométrique entre 35 et 60% comme étant un stade de maturité où l'état d'équilibre du développement du bassin est atteint. Par contre, une courbe fortement concave avec une intégrale hypsométrique inférieure à 35% se définit comme un stade de fin-maturité dominé essentiellement par des collines moyennes à basses et des buttes résiduelles (phase de Monodnock) (Strahler, 1952).

7. Erodibilité des sols

Le facteur d'érodibilité (ou érodabilité) du sol (K) est un paramètre important dans les modèles d'érosion tels que le modèle RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation). Il représente la susceptibilité d'un sol à l'érosion hydrique en fonction de ses propriétés physiques et chimiques, notamment sa texture, sa structure, sa teneur en matière organique et sa perméabilité. Le facteur K indique la facilité avec laquelle le ruissellement ou les éclaboussures de pluie peuvent déplacer le sol, ce qui constitue un indicateur clé de la dégradation du sol et de la perte de productivité agricole. Ce facteur est particulièrement important dans les zones soumises aux pressions des activités humaines, telles que l'augmentation des pratiques agricoles et la croissance démographique.

L'érodabilité du sol varie dans l'espace et dans le temps et est influencée par des facteurs environnementaux locaux. Le facteur d'érodibilité K est un facteur important pour prédire les taux d'érosion et gérer les bassins versant à risque d'érosion. Une caractérisation précise du facteur K est essentielle pour mieux anticiper et prévenir la perte de sol, car elle permet d'identifier les zones les plus vulnérables et d'adapter les pratiques de conservation des sols. Par conséquent, la prévision de l'érosion repose sur une évaluation approfondie de l'érodabilité du sol et de ses interactions avec les facteurs environnementaux.

Cette étude vise à évaluer l'érodabilité des sols des sous-bassins versants en tenant compte des propriétés physiques et chimiques des sols, telles que la taille des particules, la teneur en matière organique et la structure. Ces propriétés seront utilisées pour calculer le facteur K à partir du nomographe USLE. Les données obtenues seront incorporées dans les modèles RUSLE pour estimer la perte annuelle moyenne de sol.

L'objectif principal de cette approche est de mieux comprendre comment les caractéristiques inhérentes du sol affectent l'érosion. En combinant le facteur K avec d'autres variables telles que le facteur R (énergie pluviale) et le facteur LS (longueur et pente de la parcelle), le facteur C (couvert végétale), nous pouvons prédire avec précision les taux d'érosion. Cela nous aidera à localiser les zones les plus sensibles à l'érosion, ce qui facilitera l'élaboration de stratégies de gestion et de conservation des sols adaptées à chaque situation spécifique. Cette recherche servira de base solide à la mise en œuvre de mesures de conservation efficaces et durables, contribuant à terme à la protection des ressources en sol et à la gestion durable des bassins versants. La méthode de calcul de ce paramètre peut être établie de deux manières : la méthode graphique avec le monographique de Wischmeier et la formule numérique. Dans cette étude, on a opté pour la seconde méthode, qui est discutée en détail dans la prochaine section.

Après le calcul du facteur K de chaque échantillon (voir prochaine section), pour cartographier l'érodibilité, l'approche de krigeage ordinaire a été utilisée. Les données spatiales, les propriétés du sol et les valeurs K nécessaires pour évaluer l'érodibilité du sol ont été traitées avec le logiciel du système d'information géographique (ArcGIS 10.4.1) et un logiciel statistique (R software). Afin d'obtenir une carte de prédiction des risques d'érosion pour les systèmes pédologiques, la géostatistique est de plus en plus utilisée en conjonction avec le SIG. Pour les prédictions dans des endroits non échantillonnés, il est indispensable de déterminer le degré d'incertitude de ces prévisions. De ce fait, les approches géostatistiques font appel à la théorie stochastique de la corrélation spatiale où le krigeage est l'une des techniques d'interpolation les plus fréquemment appliquées et qui permet d'estimer la valeur des variables sur une zone géographique continue en utilisant un petit nombre de données d'échantillonnage. Cela nécessite un modèle mathématique pour décrire la covariance spatiale, généralement exprimée sous forme d'un variogramme (appelé semi-variogramme), qui, sous sa forme paramétrée, est devenu l'outil central de la géostatistique. L'explication en détail du modèle géostatistique a été déjà discutée dans le chapitre 2.

Des techniques de validation croisée ont été utilisées dans cette étude, qui consiste à supprimer un point de données et à estimer les données correspondantes à l'aide des points de données restants aux autres endroits. L'objectif principal de la validation croisée est de comparer la valeur estimée à la valeur observée afin d'obtenir des informations utiles sur les variables (Addis et Klik, 2015). Des paramètres tels que l'erreur moyenne (EM) et l'erreur quadratique moyenne font partie des facteurs efficaces que l'étude a utilisé pour sélectionner le meilleur modèle parmi les modèles testés. (RMSE) et l'indice de dépendance spatiale (SPD), compte tenu des valeurs observées et estimées. L'erreur quadratique moyenne (EQM) ou l'écart quadratique moyen moyenne (RMSD) et l'erreur moyenne (ME) sont quelques-unes des mesures les plus courantes utilisées pour évaluer la qualité des prédictions.

Pour évaluer la qualité des prédictions. L'erreur moyenne peut être négative ou positive, car nous pouvons avoir une sur-prédiction ou une sous-prédiction en tout point. Les valeurs ME et RMSE proches de zéro indiquent que les valeurs prédites sont proches des valeurs mesurées.

On s'attend à ce que les valeurs ME soient effectivement nulles si le modèle de variogramme est précis (Wackernagel, 1995). Le degré de dépendance spatiale (SPD) relie le paramètre de contribution au paramètre de seuil. Les équations suivantes ont été prises en compte lors du calcul des mesures de performance :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}$$

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)$$

$$SPD(\%) = \left(\frac{C_1}{C_0 + C_1} \right) \times 100$$

Où $O(x_i)$ est la valeur observée à l'emplacement i , $P(x_i)$ est la valeur prédite à l'emplacement i , et n est la taille de l'échantillon. En outre, C_0 est l'effet de pépite et C_1 la contribution du seuil. En ajustant la classification donnée par Cambardella et al 1994, la classification SPD induite suivante a été expliquée par : faible dépendance spatiale (SPD (%) 25%),

dépendance spatiale modérée (25%75%) (Seidel et Oliveira, 2016). L'erreur quadratique moyenne relative (RRMSE en %) a été prise en considération pour évaluer la précision de la prédiction entre les variables de différents types. La RRMSE sans dimension permet de comparer la précision pour des variables de différents types et avec différentes plages de variabilité (Park et Vlek, 2022). La RRMSE a également été calculée comme suit :

$$RRMSE(\%) = \frac{RMSE}{\bar{X}} \times 100$$

Où

X est la moyenne des valeurs observées.

8. Modélisation de la dégradation spécifique des sols

8.1. Modèle RUSLE

Le modèle RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) est un modèle empirique largement utilisé et bien accepté pour évaluer le risque d'érosion des sols. Il permet de prédire les taux d'érosion sur de vastes zones et d'estimer la production de sédiments, ce qui peut avoir un impact sur les bassins versants, les terres agricoles et les pâturages où le ruissellement se produit en raison de précipitations excessives. Ce modèle tient compte du climat, des propriétés du sol, de la topographie, de la gestion de la couverture et des pratiques de conservation pour quantifier l'érosion du sol. Les données utilisées dans le modèle RUSLE proviennent de stations météorologiques, de relevés pédologiques, de cartes topographiques et d'images satellites. Cette méthode est conçue pour estimer l'érosion annuelle du sol causée par l'impact des gouttes de pluie et l'écoulement en surface des champs en pente dans les systèmes agricoles et les pâturages, sur la base d'une équation développée par Renard et al. (1997) :

$$A = R * K * LS * C * P$$

Le modèle RUSLE a subi plusieurs modifications, notamment de nouvelles valeurs d'érosivité du ruissellement pluvial, une approche par sous-facteurs pour le calcul de l'occupation du sol et de nouveaux algorithmes de pente et d'érodabilité du sol (Renard et al., 1994).

Contrairement au modèle USLE, le modèle RUSLE calcule les facteurs différemment, en impliquant le traitement dans l'ordinateur, ce qui en fait une estimation plus précise de la perte de sol (Mateus et Salumbo, 2020 ; Renard et al., 1997). Il s'agit d'un outil puissant pour prédire les taux d'érosion dans de vastes zones et estimer la production de sédiments. Il peut être particulièrement utile dans les bassins versants, les terres agricoles et les pâturages où le ruissellement est dû à des précipitations excessives par rapport à l'infiltration.

8.1.1. Facteur R

Le facteur R (Erosivité de la précipitation) est une mesure de l'impact des précipitations, sous forme d'énergie cinétique, sur l'érosion. Il représente l'apport qui alimente le processus d'érosion en nappe et en rigole par le biais de facteurs climatiques. Le facteur R quantifie la capacité des précipitations à provoquer le détachement et le transport des particules de sol par l'impact des gouttelettes d'eau et du ruissellement à un endroit spécifique (Renard et al., 1997 ; Wischmeier et Smith, 1978).

Le facteur R peut être prédit parce que la quantité et le taux de ruissellement sont directement liés aux précipitations. Cela signifie que la valeur R augmente avec la quantité, la durée et l'intensité des précipitations. La détermination de la valeur R nécessite des données autographes sur l'intensité des précipitations. Elle est définie comme le produit de l'énergie cinétique totale par l'intensité maximale des précipitations sur 30 minutes (EI30) (Wischmeier et Smith, 1978).

Selon Wischmeier et Smith (1957), EI30 fournit des résultats fiables pour l'estimation du potentiel d'érosion pluviale, obtenu à partir d'un centième du produit de l'énergie cinétique de la tempête et de l'intensité sur 30 minutes. La valeur annuelle totale de l'IE est définie comme l'indice d'érosion pluviale. Cependant, dans les pays en voie de développement, les données sur l'intensité des précipitations sont souvent indisponibles, en particulier pour les régions éloignées. Il existe donc une tendance à utiliser les valeurs d'intensité des précipitations disponibles dans des environnements similaires ou à développer une équation de régression empirique à partir de données documentées à long terme afin d'estimer les endroits où les données nécessaires ne sont généralement pas disponibles.

Plusieurs formules établies ont été développées pour calculer le facteur d'érosivité annuelle sur la base des données locales disponibles pour différentes zones climatiques (Ghosal et Das,

2020). Ce calcul varie selon les pays et nécessite une collecte de données à long terme (Gia et al., 2018).

Pour notre étude, l'équation suivante, développée ci-dessous par Wischmeier et Smith (1978) et modifiée par Arnoldus (1980), est basée sur l'indice de Fournier modifié (MFI) à savoir :

$$R = 1,735 \times 10(1,50 \times \log \sum_1^{12} \frac{Pi^2}{P} - 0,8188)$$

Où :

R est le facteur d'érosion pluviométrique (MJ·mm·ha⁻¹·h⁻¹·y⁻¹),

Pi est la pluviométrie mensuelle (mm),

P est la pluviométrie annuelle (mm).

Des données pluviométriques couvrant 33 ans (1990-2023) ont été collectées auprès de 10 stations météorologiques. Ces données ont été importées dans le SIG car toutes les stations météorologiques sont géographiquement référencées. Les valeurs d'érosion pluviométrique des différentes stations ont été utilisées pour déterminer les zones présentant des taux d'érosion différents. Pour ce faire, la méthode d'interpolation IDW (Inverse Distance Weighted) a été utilisée dans le logiciel ArcGIS, ce qui a permis de générer une carte matricielle pour le facteur R. La méthode d'interpolation IDW a été utilisée pour déterminer les zones d'érosion. La méthode d'interpolation IDW a été choisie parce qu'elle prend en compte l'influence pondérée des points d'échantillonnage de l'érosion pluviale lors de l'interpolation. Cela signifie que l'impact de l'érosion pluviale est le plus important au point mesuré et qu'il diminue au fur et à mesure que la distance augmente. La méthode d'interpolation IDW est basée sur le principe que la valeur estimée d'un point est plus influencée par les points connus proches que par ceux qui sont plus éloignés (Weber et Englund 1994).

8.1.2. Facteur K

Le facteur K (Érodibilité du Sol) représente la résistance naturelle du sol au détachement des particules et à leur transport par les précipitations (Yadeta et al., 2021). Il indique la susceptibilité inhérente du sol à l'érosion, la quantité et le taux de ruissellement, et montre la facilité avec laquelle le sol est détaché par les gouttes de pluie ou l'eau en mouvement à la surface.

La valeur de K pour un sol spécifique dépend de la structure du sol, de la matière organique, de la distribution granulométrique et de la perméabilité (Wischmeier et Smith 1978a). Yadeta et al. (2021) ont souligné que les propriétés du sol peuvent influencer la probabilité et la gravité de l'érosion. Par conséquent, les chercheurs étudient souvent la relation entre les propriétés du sol et l'érodabilité pour déterminer la valeur K.

En général, les sols à forte teneur en sable et en argile ont des valeurs K plus faibles, tandis que les sols à forte fraction de limon ont des valeurs K plus élevées (Wischmeier et Smith 1978a). La méthode la plus utilisée pour prédire la valeur K est le nomographe d'érodabilité du sol développé par Wischmeier et al. (1971). Selon Wischmeier et Smith (1978b), le nomographe estime le facteur K comme suit :

$$K = \frac{2.173 \times 2.1 \times M^{1.14} \times (10-4) \times (12-OM) + 3.25 \times (st-2) + 2.5 \times (p-3)}{100} \quad (1)$$

Où K représente le facteur d'érodabilité du sol ($t \cdot ha \cdot h \cdot ha^{-1} \cdot Mj^{-1} \cdot mm^{-1}$);

M = paramètre granulométrique, qui est le produit de la teneur en limon (%) (particules de 0,002 à 0,1 mm de diamètre) avec (100 % d'argile).

OM = teneur en matière organique (%) du sol

S = la structure du sol

P = perméabilité du sol

La méthodologie de la cartographie spatiale a été décrite dans la section « 7. Erodibilité des sols ».

8.1.3. Facteur LS

La quantité de sédiments produits sur un site est influencée par la longueur et l'inclinaison de la pente, qui sont représentées par le facteur LS (Longueur et Pente) dans le modèle RUSLE. Des facteurs tels que le compactage, la consolidation et la perturbation du sol sont également pris en compte dans le calcul du facteur LS. Bien que l'érosion augmente avec l'inclinaison de la pente, le modèle RUSLE ne fait pas de distinction entre l'érosion des crêtes et l'érosion inter-crêtes dans le facteur S, qui évalue l'effet de l'inclinaison de la pente sur la perte de sol. Le facteur LS combiné

pour le bassin versant a été calculé à l'aide de l'application spatiale SAGA GIS et du modèle numérique d'élévation (MNE) en suivant l'équation proposée par Moore et Burch en 1986. Les facteurs tels que l'accumulation du débit et la pente ont été calculés à partir du MNE en utilisant ArcGIS Spatial Analyst et l'extension ArcHydro.

La formule du facteur LS de Wischmeier et Smith (1978) est utilisée pour calculer l'effet combiné de la longueur de la pente (L) et de la pente (S) sur l'érosion hydrique du sol. Elle s'exprime comme suit :

$$LS = \left(\frac{\lambda}{22.13} \right)^m \times (65.41 \sin^2 \theta + 4.56 \sin \theta + 0.065)$$

λ est la longueur de pente (en mètres),

θ est l'angle de la pente en degrés,

m est un exposant qui dépend de la pente, calculé comme suit :

m=0.5 si la pente est supérieure à 5 %,

m=0.4 si la pente est entre 3.5 % et 4.5 %,

m=0.3 si la pente est entre 1 % et 3 %,

m=0.2 si la pente est inférieure à 1 %.

8.1.4. Facteur C (Couverture végétale)

Le facteur C (Couverture végétale) est une mesure de la manière dont le couvert végétal, l'utilisation des terres et les systèmes de gestion des cultures affectent la perte de sol par rapport aux pertes des zones de jachère nues (Haregeweyn et al., 2017).

Le facteur C joue un rôle crucial dans l'information des décideurs politiques et des agriculteurs sur la gestion des cultures. Cependant, les données sur le facteur C ne sont pas facilement disponibles pour la plupart des cultures algériennes. Il est utilisé pour indiquer l'impact des pratiques de culture et de gestion sur les terres agricoles vulnérables sujettes à l'érosion du sol. L'importance et les effets de la couverture végétale sur le contrôle de l'érosion des sols dans les régions forestières varient en fonction de la saison et du système de production agricole (Ganasri

et Ramesh, 2016). Le taux d'érosion du sol varie souvent en fonction du couvert végétal et des pratiques de gestion des cultures.

Pour cette étude, une image satellitaire Landsat 8 acquise en 2019 a été utilisée avec diverses techniques de traitement d'images numériques. Les images ont été utilisées pour obtenir des informations précieuses relatives à la zone d'étude, permettant l'identification des classes et des caractéristiques. Les données ont été chargées dans l'ordinateur à l'aide du logiciel ArcGis 10.4 pour créer une carte d'occupation du sol. Le système de classification de l'utilisation et de l'occupation des sols comprend diverses catégories, en s'appuyant sur les techniques de télédétection et de SIG pour une meilleure identification et une meilleure analyse.

Différentes catégories ont été identifiées et des couches d'utilisation et d'occupation des sols ont été créées. Un type de classification supervisée a été utilisé pour l'étude, avec des points de vérité terrain connus connectés à l'aide d'ArcGIS et de Google Earth pour synchroniser les images. Le processus de classification a été contrôlé par la création, la gestion, l'évaluation et l'édition de signatures à l'aide de l'éditeur de signatures.

L'élaboration de la carte de l'occupation des sols a été créée en utilisant une série de traitements d'image.

La première étape consiste à l'acquisition de l'image satellitaire Landsat 8 (Figure 34), correspondante à notre zone d'étude depuis le site USGS (Earth Explorer).

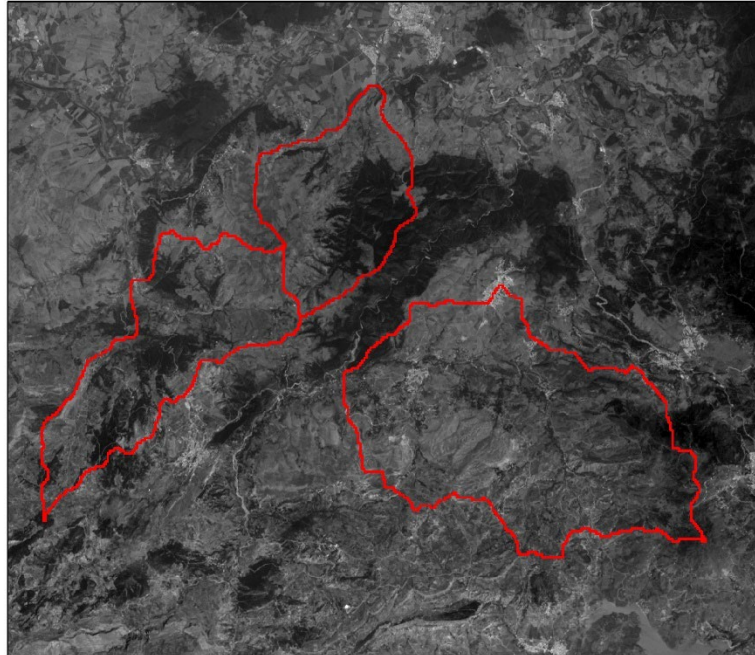


Figure 34. Photo montrant l'image satellitaire de la zone d'étude.

Ensuite on procède au choix des bandes spectrales pertinentes pour identifier les différentes zones d'utilisation des terres (sols agricole, forêt, parcours...). Une classification supervisée est élaborée, pour cela on a déterminé et choisi des régions représentatives sur le terrain (ou à partir d'images antérieures) pour chaque type d'utilisation des sols (par exemple, urbain, agricole, forestier, aquatique). Ces régions serviront d'exemples pour la formation.

Ensuite il faut utiliser les échantillons sélectionnés pour créer un ensemble de données d'entraînement. Chaque échantillon doit être affecté à la classification professionnelle appropriée. L'étape suivante consiste à utiliser des données d'entraînement pour appliquer une méthode de classification supervisée (par exemple, le maximum de similarité ou les arbres de décision) sur une image satellitaire. L'algorithme évalue les valeurs spectrales des pixels pour déterminer la classe à laquelle chaque pixel appartient, le résultat est présenté dans la figure 35. Une conversion de la carte raster est produite après classification en format vectorielle (Figure 35).

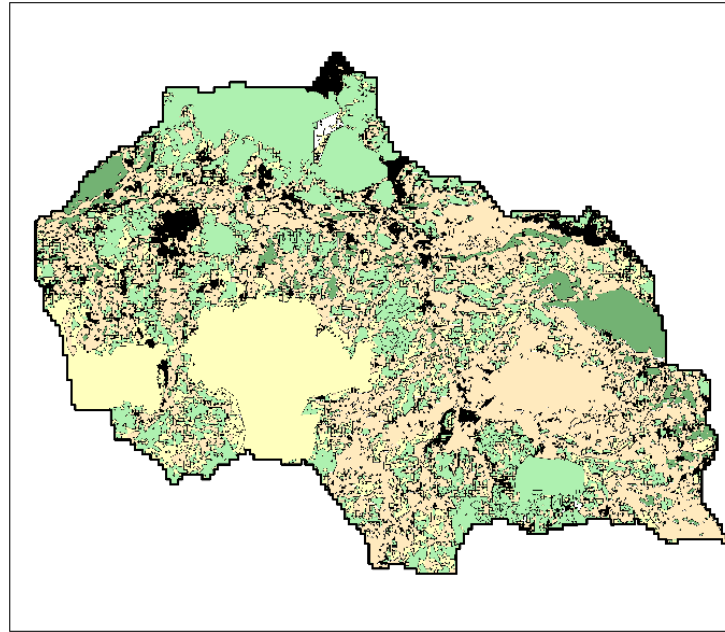


Figure 35. Photo montrant le résultat après classification supervisée.

Ensuite on valide les résultats en comparant la catégorisation à des données réelles si elles sont disponibles (Figure 36).

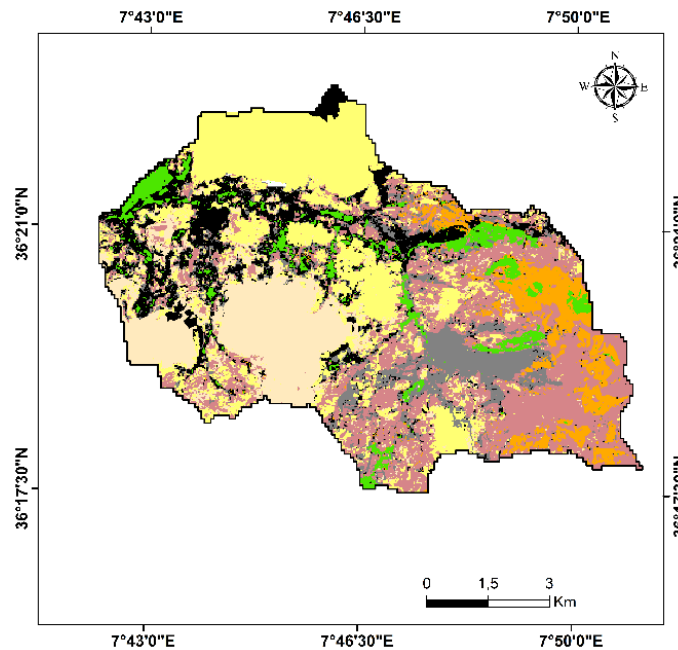


Figure 36. Photo montrant image après identification des zones d'occupation du sol.

La dernière étape consiste à améliorer et de lisser les polygones de chaque classe d'utilisation des terres, le résultat de la carte final est représenté dans la figure 37.

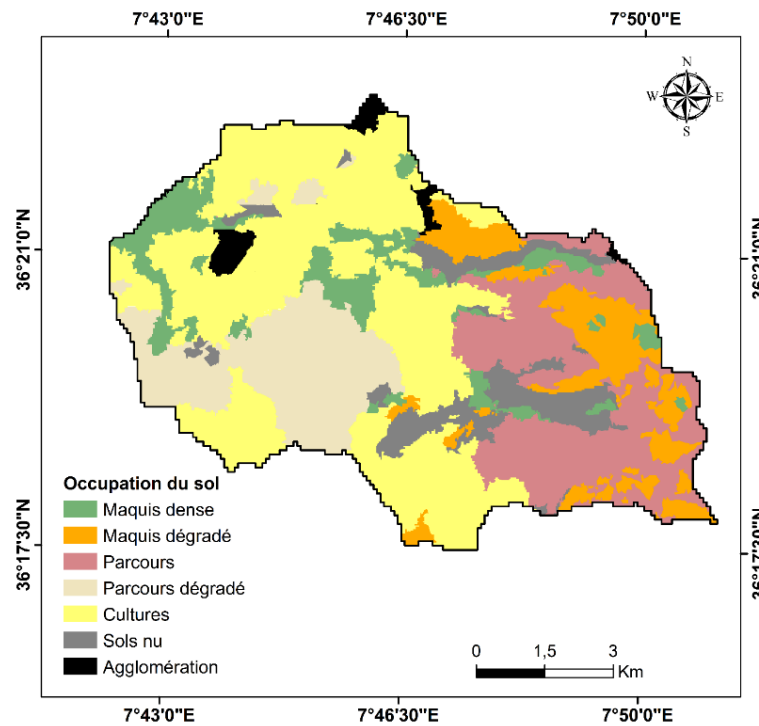


Figure 37. Carte d'occupation du sol finale après amélioration.

8.1.5. Facteur P

Le facteur de pratique de conservation P (Pratiques de Conservation) est un paramètre crucial représentant le rapport entre la perte de sol dans un champ avec des pratiques de soutien spécifiques et la perte de sol correspondante dans des conditions de travail du sol en amont et en aval de la pente (Alewell et al., 2019).

Le facteur P varie de 0 à 1, où 0 signifie une bonne pratique de conservation et 1 indique une mauvaise pratique de conservation. Dans cette recherche, P est délibérément égal à un dans l'ensemble du bassin versant en raison de l'absence de travaux de contrôle de l'érosion dans les bassins versants de la zone d'étude et de la non-utilisation de pratiques de labour de conservation ou de labour en courbes de niveau par les agriculteurs, contribuant ainsi à l'érosion incontrôlée du sol.

8.2. Carte de Sensibilité à l'érosion

Une carte de sensibilité à l'érosion est un outil utilisé pour analyser et identifier les zones vulnérables d'un territoire spécifique qui sont sujettes à l'érosion. Cette carte est créée en combinant et en croisant différents types de données géographiques afin d'obtenir une compréhension globale des facteurs affectant l'érosion des sols.

La cartographie des zones sensibles prend en considération les facteurs d'érosion liés aux caractéristiques physiques du bassin, notamment la topographie, la lithologie et l'occupation des sols, et l'ajout du facteur d'érodabilité du sol K pour notre étude de recherche.

La compréhension des modèles d'érosion est cruciale pour la production de cartes précises, en particulier lorsque des interprétations contradictoires apparaissent dans les zones de contact des cartes. Sur la base des informations collectées, trois classes de sensibilité à l'érosion sont identifiées pour déterminer les niveaux croissants d'érosion.

Pour chaque facteur d'érosion, une carte de sensibilité potentielle est générée à l'aide du logiciel ArcGis, un outil essentiel pour mettre en évidence les zones sensibles à l'érosion.

8.2.1. Le facteur pente

Le principal facteur influençant la sensibilité du sol à l'érosion est la pente. Nous la déterminons en calculant la pente à partir du modèle numérique de terrain. En fonction de son effet sur les processus érosifs, nous avons identifié trois classes de sensibilité à l'érosion :

- Classe des pentes à sensibilité réduite : 0 à 3%
- Classe des pentes à sensibilité moyenne : de 3 à 10%
- Classe des pentes à grande sensibilité : plus de 10%

8.2.2. Le facteur lithologie

Le deuxième facteur est la nature des formations de surface et son impact sur l'érodabilité du sol. La zone d'étude comprend x classes lithologiques représentées dans le tableau 7.

De la même procédure que le facteur pente la sensibilité à l'érosion des formations lithologiques des trois sous-bassin versants peut être divisée en trois classes :

- Classe à sensibilité réduite : Grès, Calcaire, Calcaire Gréseux.

- Classe à sensibilité moyenne : Calcaires marno-calcaires, Argile et conglomérats, Calcaires lacustres, Grès et marne, Grès argileux, Marnes et calcaires.

- Classe à grande sensibilité : Formation argilo gypseuse gréseuse, calcaire ; Formation superficielle.

8.2.3. Le facteur du couvert végétal

Sur la base de la carte d'occupation des sols, les classes de sensibilité retenues sont les suivantes :

- Classes à sensibilité réduite : Forêts et maquis denses, parcours denses, et tissu urbain,
- Classes à moyenne sensibilité : Maquis dégradés et parcours clairsemés,
- Classes à grande sensibilité : Zones de cultures et sols nus.

8.2.4. Le facteur d'érodibilité des sols (K)

Par la même méthode et sur la base de la carte du facteur K, les classes de sensibilité sont les suivantes :

- Classe à sensibilité réduite : $K < 0,07$ et $0,007 < K < 0,03$
- Classe à sensibilité moyenne : $0,03 < K < 0,04$
- Classe à grande sensibilité : $0,04 < K < 0,05$ et $K > 0,05$

En ce qui concerne la localisation des zones sensibles à l'érosion, les zones sujettes à l'érosion ont été identifiées à l'aide de cartes thématiques croisées telles que des cartes de végétation, des cartes de pente et des cartes lithologiques et du facteur d'érodibilité des sols dans le système d'information géographique ArcMap.

Les cartes croisées contiennent toutes les informations de chaque carte individuelle et sont interprétées comme des combinaisons logiques entre les paramètres qui indiquent la sensibilité de chaque paire de cartes.

Les paramètres d'identification de la zone peuvent être des caractères ou des nombres. Dans notre exemple, nous avons fourni des indices numériques en corrélation avec les différents degrés de sensibilité. Comme nous avons trois niveaux de sensibilité (faible, moyen et élevé), nous avons

choisi des indices numériques dont les valeurs varient de 1 à 3. Ces indices ont été attribués aux différentes parties des cartes thématiques en fonction de leur niveau de sensibilité. (Tableau 12).

Tableau 12. Les indices de sensibilité des cartes thématiques.

Classe de sensibilité	Indice
Réduite	1
Moyenne	2
Grande	3

Chaque combinaison de paramètres se voit attribuer une susceptibilité proportionnelle à l'érosion mécanique. Il s'agit d'une méthode qualitative.

Une comparaison préliminaire est effectuée entre la carte de sensibilité potentielle basée sur l'occupation du sol et celle basée sur les pentes (Tableau 13). Ce croisement est réalisé par l'intersection de zones superposées, ce qui a pour effet de séparer les zones superposées en de nombreuses portions en fonction des limites de leur périmètre. Dans cette méthode, l'indice de sensibilité des régions sur la carte à partir du premier croisement (occupation du sol, pentes) a été calculé en additionnant les deux indices pour chaque couche. On peut ainsi différencier plusieurs valeurs d'indice distinctes pour la carte de croisement.

Tableau 13. Valeurs probables des indices de la carte du premier croisement (occupation du sol et pentes).

Cas n°	a	b	c
1	1	1	2
2	1	2	3
3	1	3	4
4	2	1	3
5	2	2	4
6	2	3	5
7	3	1	4
8	3	2	5
9	3	3	6

a : indices des zones de la carte d'occupation du sol, b : indices des zones de la carte des pentes, c : indices des zones de la carte de croisement avec : $c = a + b$.

Les résultats du premier croisement (occupation du sol et pentes) sont superposés à la carte lithologique. En agrégeant les indices correspondant aux couches primaires d'information sur la

deuxième carte croisée, on peut déterminer la sensibilité à l'érosion de l'ensemble du bassin versant considéré, en tenant compte de l'occupation du sol, de la topographie et de la lithologie. L'indice de sensibilité des régions sur la deuxième carte croisée est toujours égal à la somme des trois indices de chaque couche. Les zones de la carte de croisement finale ont des valeurs d'indice allant de 3 à 9 (tableau 14). Ces chiffres sont le résultat des différentes probabilités de combinaisons potentielles.

Tableau 14. Valeurs probables des indices de la carte du deuxième croisement (occupation du sol, pentes, lithologie).

Cas n°	c	d	e
1	2	1	3
2	2	2	4
3	2	3	5
4	3	1	4
5	3	2	5
6	3	3	6
7	4	1	5
8	4	2	6
9	4	3	7
10	5	1	6
11	5	2	7
12	5	3	8
13	6	1	7
14	6	2	8
15	6	3	9

c : indices des zones de la carte croisement (occupation du sol, pente) ; d : indices des zones de la carte de la lithologie ; e : indices des zones de la carte de croisement (occupation du sol, pente, lithologie), avec : $e = c + d$.

Pour la dernière combinaison on a rajouté à cette dernière combinaison une 4ème carte du facteur d'érodibilité K. Les valeurs de l'indice pour les zones de la carte de croisement finale varient de 4 à 12 (Tableau 15). Ces valeurs sont basées sur les différentes probabilités de combinaisons possibles.

Tableau 15. Valeurs probables des indices de la carte du troisième croisement (occupation du sol, pentes, lithologie et facteur K).

Cas n°	e	f	g
1	3	1	4
2	3	2	5
3	3	3	6
4	4	1	5
5	4	2	6
6	4	3	7
7	5	1	6
8	5	2	7
9	5	3	8
10	6	1	7
11	6	2	8
12	6	3	9
13	7	1	8
14	7	2	9
15	7	3	10
16	8	1	9
17	8	2	10
18	8	3	11
19	9	1	10
20	9	2	11
21	9	3	12

e : indices des zones de la carte croisement (occupation du sol, pente et lithologie) ; f : indices des zones de la carte d'érodibilité ; g : indices des zones de la carte de croisement (occupation du sol, pente, lithologie et érodibilité), avec : $g = e + f$.

Les valeurs d'indice correspondant à la carte de croisement finale reflètent le degré de susceptibilité à l'érosion en fonction de critères (utilisation des sols, pentes, lithologie, érodibilité). Ces valeurs sont comprises entre 4 et 12.

Le processus de combinaison consiste à additionner les indices de chaque paramètre dans le but de déterminer le degré de sensibilité à l'érosion. Plus le résultat final est élevé, plus la sensibilité est grande.

Les valeurs comprises entre 4 et 6 indiquent des zones où la combinaison des facteurs entraîne une sensibilité réduite à l'érosion. Par exemple, si les indices de chaque paramètre (a, b, c et d) sont faibles (comme 1 ou 2), la valeur de « e » est faible. Le cas 1 (e = 4) peut signifier une pente douce, une lithologie stable, une végétation dense et un facteur K faible.

Les valeurs comprises entre 7 et 9 indiquent une sensibilité moyenne à l'érosion. Elles proviennent souvent de combinaisons où un ou deux des facteurs présentent une plus grande vulnérabilité (indice de 2 ou 3). Le cas 7 (e = 8) peut refléter une pente modérée, une végétation clairsemée et une lithologie modérément érodable.

Les valeurs élevées comprises entre 10 et 12 indiquent des zones très sensibles à l'érosion, ils combinent probablement des paramètres qui montrent tous un niveau élevé de potentiel d'érosion, avec des indices allant jusqu'à 3 pour chaque facteur.

Le cas 15 (e = 12) est probablement une zone à forte pente, à la lithologie instable, à la végétation clairsemée et au facteur K élevé, qui favorise une forte érosion.

- Résumé de la sensibilité :

Sensibilité réduite ($e \leq 6$) : Sols stables, faible érosion attendue.

Sensibilité moyenne ($7 \leq e \leq 9$) : Risque d'érosion modéré, à surveiller en fonction des conditions.

Sensibilité élevée ($e \geq 10$) : Zones critiques nécessitant une action pour prévenir les dommages dus à l'érosion.

Ces résultats peuvent être utilisés pour cartographier les zones sensibles à l'érosion et mettre en œuvre des stratégies de gestion appropriées pour chaque catégorie de risque, en mettant particulièrement l'accent sur les zones identifiées comme très sensibles.

8.3. Estimation de la dégradation spécifique

Pour calculer la dégradation spécifique d'un bassin versant, on utilise le taux de délivrance de sédiments (SDR, Sediment Delivery Ratio). En appliquant le SDR aux taux d'érosion obtenus (A), on peut calculer le transport solide en suspension (SY) à l'exutoire du bassin versant, qui est un indicateur important pour analyser l'impact de l'érosion sur la sédimentation en aval et la qualité du sol.

Le rapport de livraison des sédiments (SDR) est un facteur important pour comprendre comment les sédiments se déplacent dans un bassin versant. Il mesure la quantité de sédiments érodés qui atteint un point spécifique en aval, tel que l'exutoire d'un bassin, par rapport à la quantité totale de sédiments érodés en amont.

Dans notre étude, nous avons évalué l'érosion hydrique et la production de sédiments en utilisant le modèle Sédiment Delivery Ratio (SDR) ainsi que des estimations du transport solide en suspension (SY). Le modèle SDR, développé par Williams et al. (1983), est largement utilisé pour estimer la proportion de sédiments générés par l'érosion qui sont effectivement transportés et livrés aux cours d'eau. Ce modèle est basé sur la relation entre la production de sédiments à la source et leur transport vers un point de drainage spécifique.

Pour cette étude, nous avons utilisé le modèle SDR afin de prendre en compte les variations locales de la topographie, de la couverture végétale et des caractéristiques du sol, en suivant les recommandations de Deschênes et al. (2007) pour une calibration spécifique aux conditions locales. Entre-temps, la production de sédiments a été calculée en combinant les données sur les flux de sédiments et les concentrations de sédiments mesurées en utilisant les méthodes décrites par Walling et al. (1999). Cette approche nous a permis de quantifier avec précision le volume de sédiments érodés et leur distribution spatiale, fournissant ainsi une base solide pour l'analyse de l'impact de l'érosion hydrique sur les sols étudiés.

Pour déterminer le modèle du SDR le plus approprié, trois formules ont été sélectionnées : les formules de Williams et Berndt's (1972), Maner (1958) et Zhao and Shi (2002).

On a calculé le SDR des trois bassins en utilisant ces trois formules, dont on a retenu celle qui présente le coefficient de variation le plus faible.

La formule qui a donné le coefficient de corrélation le plus faible est celle de Mener (1958) :

$$\text{SDR}=1,8768-0,4191 \log(10A)$$

Où

A est la surface du sous-bassin versant.

Enfin la dégradation spécifique (DS) n'est autre que le produit du résultat de RUSLE ou Erosion (A (t/hectare/an) et le SDR.

Conclusion

Dans ce chapitre on a décrit les méthodes utilisées pour étudier l'érosion des sols dans les bassins versant de notre région d'étude. Nous avons commencé par des méthodes d'échantillonnage et de prospection sur le terrain, qui sont nécessaires pour collecter des données nécessaires. Les paramètres du sol ont été évalués à l'aide d'analyses physico-chimiques, et les données ont été interprétées de manière approfondie à l'aide d'analyses géostatistiques et statistiques.

L'étude morphométrique nous fournira des informations essentielles sur l'intensité de l'érosion hydrique, qui affecte directement l'érosion du sol. L'érodibilité des sols représentés par le facteur K, est une autre mesure importante de la résistance du sol face à l'érosion hydrique ; ce paramètre est influencé par divers paramètres physico-chimiques.

Les pertes de sol sont évaluées à l'aide du modèle RUSLE, qui prend en compte de nombreuses variables érosives. Enfin, l'élaboration de carte de sensibilité à l'érosion, ainsi que l'analyse des taux de délivrance de sédiment (SDR) et de transport solide en suspension (SY), vont permettre d'identifier les endroits à haut risque et de mieux comprendre la dynamique de l'érosion.

CHAPITRE 4 :

Résultats et Discussions

Introduction

L'érosion hydrique des sols est une caractéristique importante de la géomorphologie qui est fortement influencée par les caractéristiques du sol et les conditions environnementales du bassin versant. Cette étude se concentre sur l'étude de trois sous-bassins versants afin de mieux comprendre la dynamique de l'érosion qui les affectent, tout en tenant compte d'une variété de caractéristiques physico-chimiques et géomorphologiques.

Ce chapitre présente les résultats des analyses effectuées pour évaluer l'érosion hydrique dans les sous-bassins analysés. Nous nous concentrons sur l'érodabilité du sol, évaluée par le facteur K, de l'utilisation de l'équation universelle révisée de perte de sol (RUSLE) et de l'estimation de la dégradation spécifique au niveau des exutoires. En outre, des cartes de sensibilité à l'érosion sont créées pour mettre en évidence les zones à risque d'érosion dans les sous-bassins versants.

Les propriétés physico-chimiques telles que le pH, la conductivité, la matière organique et la granulométrie ont été examinées au laboratoire. Ces analyses permettent d'identifier les liens entre les propriétés, fournissant ainsi des informations essentielles à la compréhension des processus morphogéniques.

Dans ce chapitre, nous analysons la variabilité spatiale des résultats obtenus, les facteurs influençant l'érosion dans les sous-bassins étudiés, et les implications pour la gestion à long terme des ressources en sol. Ces discussions sont essentielles pour concevoir des mesures de conservation adaptées à chaque sous-bassin ainsi que pour réduire l'impact de l'érosion hydrique sur les écosystèmes locaux.

1. Analyses Physico-Chimiques des sols

1.1. Analyse de pH

1.1.1. Sous-bassin versant de l'Oued Rhirane

Le pH-H₂O du sol du sous-bassin de l'Oued Rhirane varie de 6 à 8,27 (Figure 38 et Tableau 16), ce qui montre que les sols sont légèrement acides à légèrement alcalins. La classe légèrement acide à neutre occupe une faible surface et se localise principalement à l'Est du sous-bassin. Les

classes à pH basique sont réparties sur toute la surface du sous-bassin, tandis que les classes à pH basique sont localisées dans la partie Sud-Est et la partie Ouest du sous-bassin versant.

Le résultat du pH-KCl varie entre 5 et 9,91 (Figure 38, Tableau 17). Ce pH donne une idée plus précise de l'acidité du sol, car le KCl neutralise les bases échangeables, révélant une acidité du sol plus précise que le pH-H₂O.

Les valeurs du pH les plus basses sont localisées dans les sols couverts par le maquis en raison de la litière fournie par ce type de couvert végétal, qui abaisse légèrement le pH.

Cette variation dans le pH du sol est liée à la lithologie, qui est déterminée par le type de la roche mère, qui donne au sol les calcaire et les minéraux tels que les calcites ; ces derniers influencent les propriétés chimiques et physiques du sol.

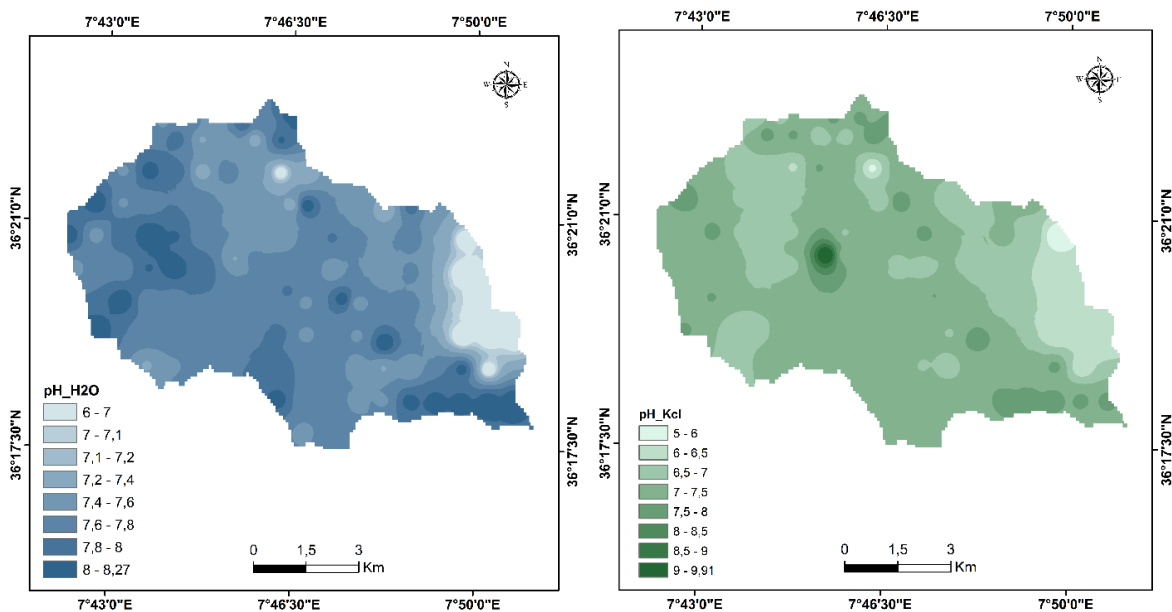


Figure 38. Carte du pH-H₂O et pH-KCl du sous-bassin versant de l'Oued Rhirane.

Tableau 16. Répartitions des classes du pH-H₂O du sous-bassin de l'Oued Rhirane.

Classes du pH-H ₂ O	Surface (km ²)	Surface (%)
6 - 7	3,18	3,95
7 - 7,1	1,52	1,89
7,1 - 7,2	1,01	1,25
7,2 - 7,4	3,52	4,38
7,4 - 7,6	18,25	22,72
7,6 - 7,8	34,56	43,01
7,8 - 8	12,96	16,13
8 - 8,27	5,36	6,67

Tableau 17. Répartitions des classes du pH-KCl du sous-bassin de l'Oued Rhirane.

Classes du pH-KCl	Surface (km ²)	Surface (%)
5 - 6	0,45	0,56
6 - 6,5	5,69	7,08
6,5 - 7	19,14	23,82
7 - 7,5	49,59	61,72
7,5 - 8	4,86	6,05
8 - 8,5	0,31	0,38
8,5 - 9	0,15	0,19
9 - 9,91	0,16	0,20

1.1.2. Sous-bassin versant de L'Oued Melah

Le sous-bassin de l'Oued Melah présente un pH-H₂O qui varie de 7,4 à 8,76 (Figure 39, Tableau 18). Ces valeurs indiquent que les sols sont neutres à légèrement alcalin, qui peuvent être influencés par des formations calcaires. Les classes du sol à pH neutre se localisent dans la partie Sud du sous-bassin, tandis que les sols à pH basique sont alcalins et se localisent dans la partie centrale Sud du sous-bassin.

Le pH-KCl, allant de 6,8 à 8,24 (Figure 39), révèle que même si le pH-H₂O est relativement élevé, les sols influencés par les matériaux calcaires présentent encore une acidité résiduelle modérée. Cette variation du pH dans la solution de KCl reflète l'impact des bases échangeables sur la mesure de l'acidité réelle du sol.

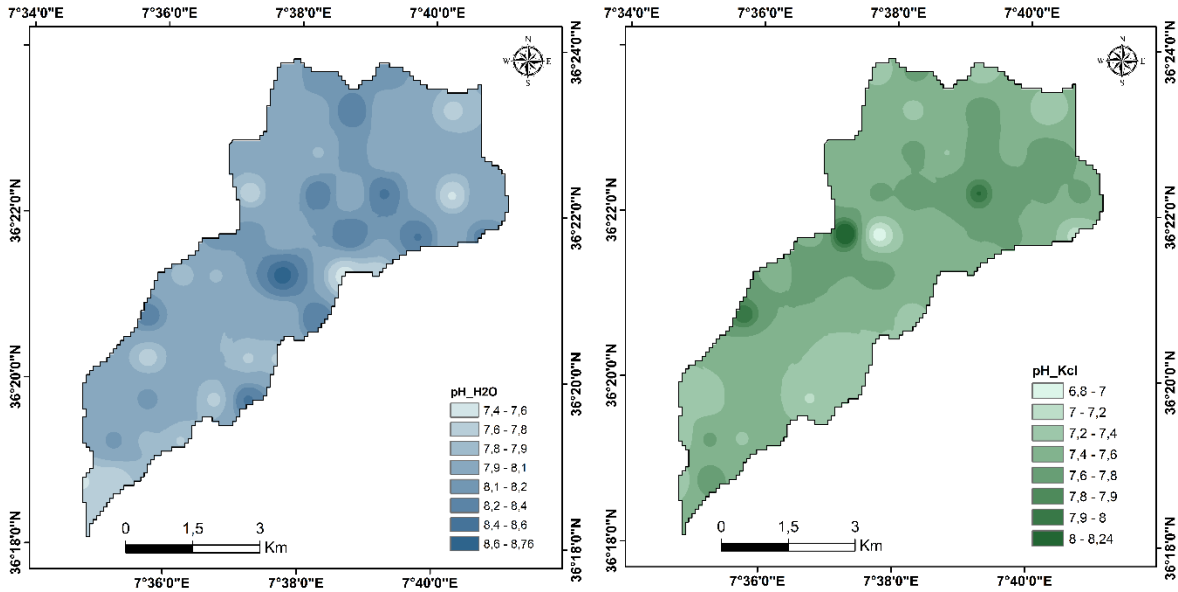


Figure 39. Carte du pH-H₂O et pH-KCl du sous-bassin versant de l’Oued Melah.

Tableau 18. Répartition des classes du pH-H₂O du sous-bassin de l’Oued Melah.

Classes du pH-H ₂ O	Surface (km ²)	Surface (%)
7,4 - 7,6	0,14	0,35
7,6 - 7,8	1,96	4,96
7,8 - 7,9	4,36	11,01
7,9 - 8,1	23,05	58,25
8,1 - 8,2	6,48	16,37
8,2 - 8,4	3,13	7,92
8,4 - 8,6	0,34	0,86
8,6 – 8,76	0,11	0,28

Tableau 19. Répartition des classes du pH-KCl du sous-bassin de l’Oued Melah.

Classes du pH-KCl	Surface (km ²)	Surface (%)
6,8 - 7	0,07	0,16
7 - 7,2	0,26	0,67
7,2 - 7,4	6,44	16,27
7,4 - 7,6	21,99	55,55
7,6 - 7,8	9,49	23,98
7,8 - 7,9	0,84	2,12
7,9 - 8	0,33	0,84
8 - 8,24	0,16	0,41

1.3.3. Sous-bassin versant de l'Oued Bouzerag

Le pH dans le sous-bassin versant de l'Oued Bouzerag varie de 7,4 à 8,4 (Figure 40), montrant des sols légèrement basiques à légèrement alcalins. Les sols à pH basique de 7,4 à 7,7 (Tableau 20) se trouvent dans toute la partie Est du sous-bassin versant. Les sols ayant un pH basique élevé à légèrement alcalin se trouvent dans le reste du sous-bassin versant.

Cette variabilité est directement liée à la composition géologique du sous-bassin. La présence de calcaire et de grès favorise un pH plus neutre à basique. Les calcaires sont altérables, qui contribuent à la régulation du pH et à la réduction de l'acidité du sol.

En outre, les résultats du pH-KCl sont compris entre 6,3 et 7,95 (Figure 40). Ce pH plus faible indique une acidité latente, qui peut ne pas être visible dans les mesures de pH-H₂O. Les environnements à végétation dense, en particulier les maquis, présentent des valeurs acides plus élevées en raison de la décomposition de la matière organique, qui produit des acides organiques.

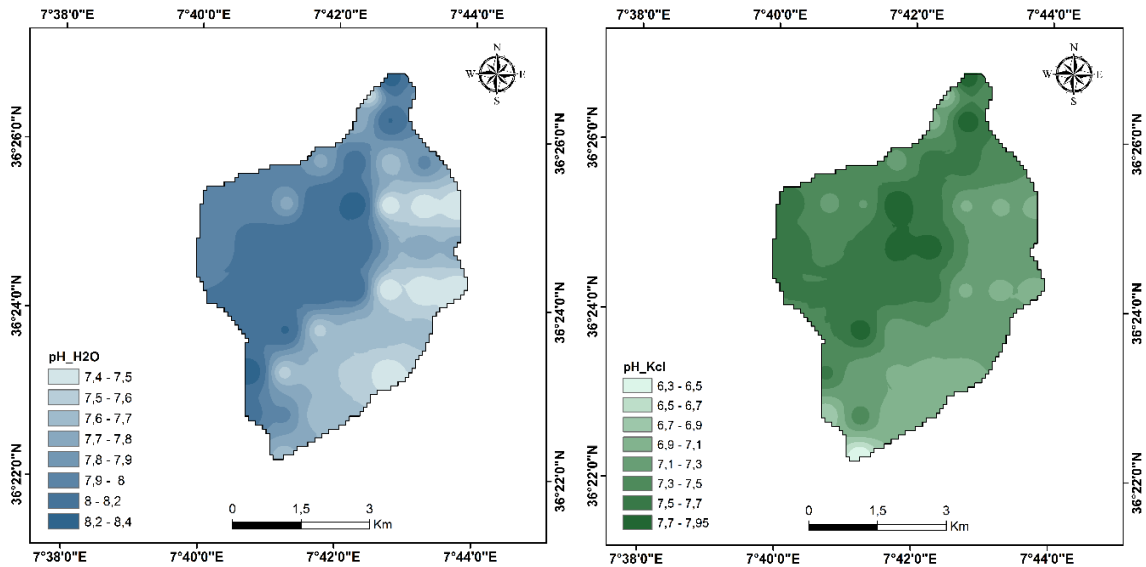


Figure 40. Carte du pH-H₂O et pH-KCl du sous-bassin versant de l'Oued Bouzerag.

Tableau 20. Répartition des classes du pH-H₂O de l'Oued Bouzerag.

Classes du pH-H ₂ O	Surface (km ²)	Surface (%)
7,4 - 7,5	1,91	6,39
7,5 - 7,6	2,85	9,53
7,6 - 7,7	5,02	16,80
7,7 - 7,8	2,95	9,85
7,8 - 7,9	2,60	8,70
7,9 - 8,0	5,23	17,48
8,0 - 8,2	8,80	29,42
8,2 - 8,4	0,55	1,82

Tableau 21. Répartition des classes du pH-KCl du sous-bassin versant de l'Oued Bouzerag.

Classes du pH-KCl	Surface (km ²)	Surface (%)
6,3 - 6,5	0,11	0,37
6,5 - 6,7	0,09	0,31
6,7 - 6,9	0,27	0,93
6,9 - 7,1	3,79	13,30
7,1 - 7,3	8,43	29,61
7,3 - 7,5	7,22	25,34
7,5 - 7,7	8,58	30,13
7,7 - 7,95	0,00001	0,00003

1.2. Analyse de la conductivité électrique

1.2.1. Sous-bassin versant de l'Oued Rhirane

La carte de la conductivité électrique (CE) (Figure 41) du sous-bassin versant de l'Oued Rhirane varie de 30 à 1149 $\mu\text{S}/\text{cm}$, avec une moyenne de 205,42 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ceci représente les diverses qualités du sol. Le sous-bassin est dominé par une classe de 150 à 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Tableau 22), qui couvre 83,38% de la surface totale, répartie sur toute la surface du sous-bassin versant. Ceci peut suggérer une légère minéralisation ou salinité modérée. Cette dispersion pourrait s'expliquer par la nature des particules du sol, la teneur en matière organique et la présence d'argiles, dont il a été démontré qu'elles modifient la rétention de l'humidité et le transport des ions. Les valeurs élevées occupent des régions extrêmement petites localisées au centre vers le Nord du sous-bassin, ce qui pourrait indiquer une accumulation de sel ou une détérioration du sol causée par

l'érosion, le dépôt de limon ou des activités humaines telles que l'agriculture intensive. Cette distribution de la CE pourrait donner des indications sur les zones exposées à l'érosion ou à la perte de fertilité du sol.

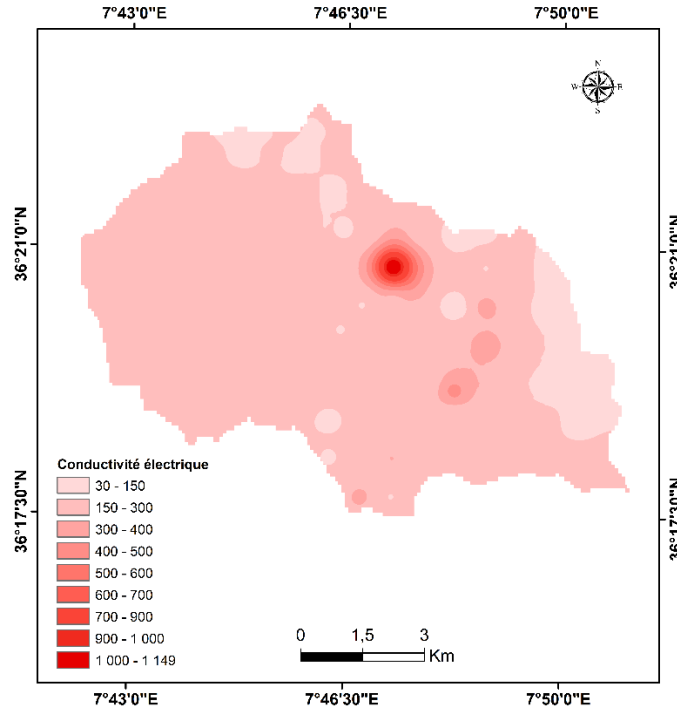


Figure 41. Conductivité électrique du sous-bassin versant de l'Oued Rhirane.

Tableau 22. Résultats de l'analyses de la conductivité électrique de l'Oued Rhirane.

Classe	Surface (km ²)	Surface (%)
30 – 150	9,64	12,00
150 – 300	67,00	83,38
300 - 400	2,28	2,84
400 - 500	0,54	0,67
500 - 600	0,29	0,36
600 – 700	0,18	0,23
700 - 900	0,24	0,30
900 - 1000	0,09	0,11
1000 - 1149	0,10	0,12

1.2.2. Sous-bassin versant de l'Oued Melah

Le sous-bassin versant de l'Oued Melah présente une conductivité électrique variant de 130 à 619 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Figure 42, Tableau 23), avec une moyenne de 304,79 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Le sous-bassin est principalement caractérisé par des classes de conductivité faibles à modérées réparties sur l'ensemble de sa surface. Les classes ayant les conductivités élevées occupent une faible surface sous forme de petits lambeaux localisés au Nord-Est et dans la partie Sud du sous-bassin versant.

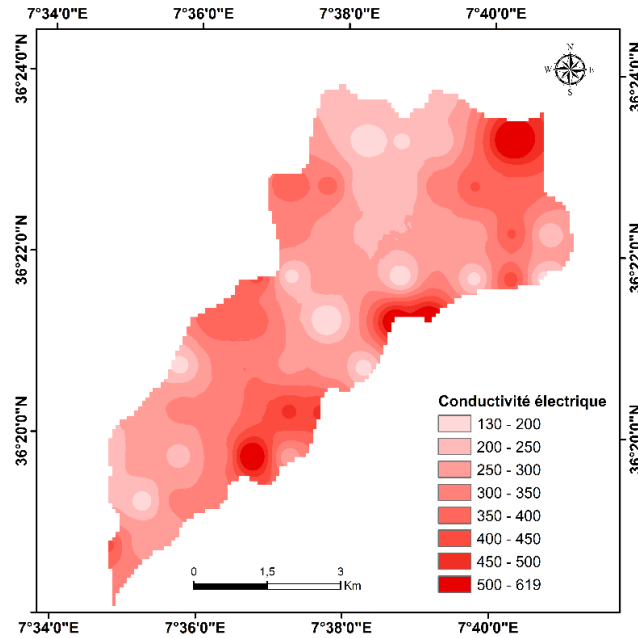


Figure 42. Conductivité électrique du sous-bassin versant de l'Oued Melah.

Tableau 23. Résultats de l'analyse de la conductivité électrique du sous-bassin de l'Oued Melah.

Classes	Surface (km ²)	Surface (%)
130 - 200	1,36	3,44
200 - 250	8,18	20,67
250 - 300	11,99	30,29
300 - 350	8,92	22,54
350 - 400	5,39	13,61
400 - 450	1,89	4,77
450 - 500	0,88	2,23
500 - 619	0,97	2,44

1.2.3. Sous-bassin versant du sous-bassin de l'Oued Bouzerag

La conductivité électrique du sous-bassin versant de l'Oued Bouzerag varie de 100 à 717 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Figure 43 et Tableau 24) avec une moyenne de 258,61 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La classe de conductivité de 100 à 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$, couvre 31,58 % de la surface totale. Ces sols présentent une faible conductivité électrique donc ils ont probablement une faible salinité et une faible concentration d'ions dissous. La classe de 200 à 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ occupe la plus grande surface du sous-bassin de 40,76 % (Tableau 24) et représente les sols à conductivité modérée. Cela suggère une minéralisation plus importante, peut-être due à des processus d'érosion ou à des apports modérés de nutriments. La troisième classe de 300 à 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$, couvre 20,78 % de la zone et représente les sols avec une conductivité plus élevée, cela est sûrement due à une accumulation de sels ou d'autres particules conductrices. Ces sols peuvent être d'avantage influencés par des processus d'érosion ou des apports sédimentaires plus riches en éléments dissous.

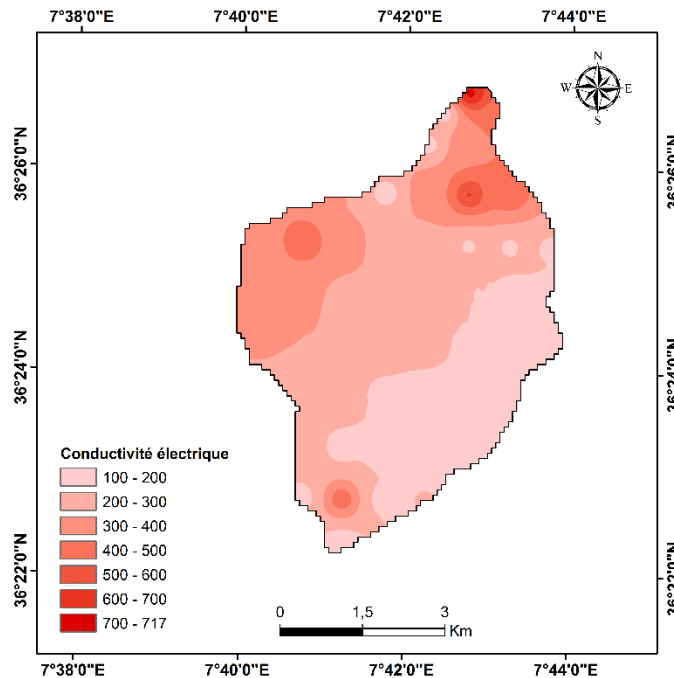


Figure 43. Conductivité électrique du sous-bassin versant de l'Oued Bouzerag.

La classes de conductivité électrique relativement élevée à élevée, comprises entre 400 et 717 $\mu\text{S}/\text{cm}$, occupent une surface relativement faible. Ces zones se présentent sous la forme de petites zones circulaires. Les zones de conductivité plus élevée peuvent indiquer des points spécifiques où se concentrent les sels issus des processus géologiques ou anthropiques.

Tableau 24. Résultats de l'analyses de la conductivité électrique du sous-bassin de l'Oued Bouzerag.

Classes da la conductivité électrique	Surface (km ²)	Surface (%)
100 - 200	9,44	31,58
200 - 300	12,19	40,76
300 - 400	6,21	20,78
400 - 500	1,69	5,64
500 - 600	0,27	0,89
600 - 700	0,09	0,29
700 - 717	0,02	0,06

1.2.4. Discussion sur le pH et la conductivité électrique

Les variations du pH sont des indications importantes de l'érosion du sol. L'acidité peut endommager les agrégats du sol, les rendant plus vulnérables à l'érosion. Des niveaux de pH plus bas peuvent réduire la stabilité des agrégats, rendant le sol plus sensible à l'érosion hydrique. En revanche, les sols neutres ou légèrement acides conservent mieux leur structure, ce qui les rend plus résistants à l'érosion.

La conductivité électrique du sol reflète la teneur du sol en sel minéraux. Lorsque le sol s'érode, il perd la couche arable riches en nutriments, ce qui peut diminuer la conductivité électrique. Ainsi, une diminution de la conductivité peut indiquer une dégradation causée par l'érosion et une baisse de la fertilité.

Dans ce travail, nous avons réalisé une analyse de corrélation pour étudier la relation entre la conductivité électrique et du pH du sol avec l'érosion, dans le but de mieux comprendre comment ces paramètres affectent l'érosion du sol. Pour cela, on a fait une corrélation entre le pH, la conductivité électrique et le facteur d'érodibilité (K). Le coefficient de corrélation (R) était inférieur à 0,01, ce qui signifie qu'il n'y a pas de relation significative entre ces variables physico-chimiques et l'érosion.

1.3. Analyse de la matière organique et la granulométrie

1.3.1. Sous-bassin versant de l’Oued Rhirane

Les cartes de distribution des particules du sol de limon, de sable et de l’argile ainsi que la matière organique, réalisées par la méthode d’interpolation de krigeage, sont présentées dans les figures 44 à 46.

L’analyse statistique des propriétés du sol du sous-bassin versant de l’Oued Rhirane est présentée dans le Tableau 25. La valeur moyenne du sable et du limon est la plus élevée avec 30 % et 29 %, respectivement, tandis que l’argile ne représente que 24 %. La matière organique varie entre 0,12 % à 4,80 %. Avec une valeur moyenne de 2,31 %, la teneur en matière organique a un impact significatif sur la qualité de la structure du sol. La concentration en carbone organique est favorablement corrélée avec les agrégats stables à l’eau et le diamètre des pores, ce qui améliore l’aération des sols riches en argile (Soinne et al., 2023). La faible teneur en matière organique, causée principalement par l’érosion en nappe et par le ravinement dans les régions arides et semi-arides, est probablement liée à la morphologie et aux pratiques agricoles intensives qui épuisent le sol.

Tableau 25. Statistiques descriptives des paramètres du sol du sous-bassin versant de l’Oued Rhirane.

Paramètres	Argile	Limon	Sable	MO
Min	0,76	4,28	9,36	0,12
Max	59,04	62,80	64,95	4,80
Moyenne	23,96	29,46	30,21	2,31
Ecart type	13,29	11,83	10,69	1,25
Cv	55,48	40,14	35,37	54,01

Cv = coefficient de variation

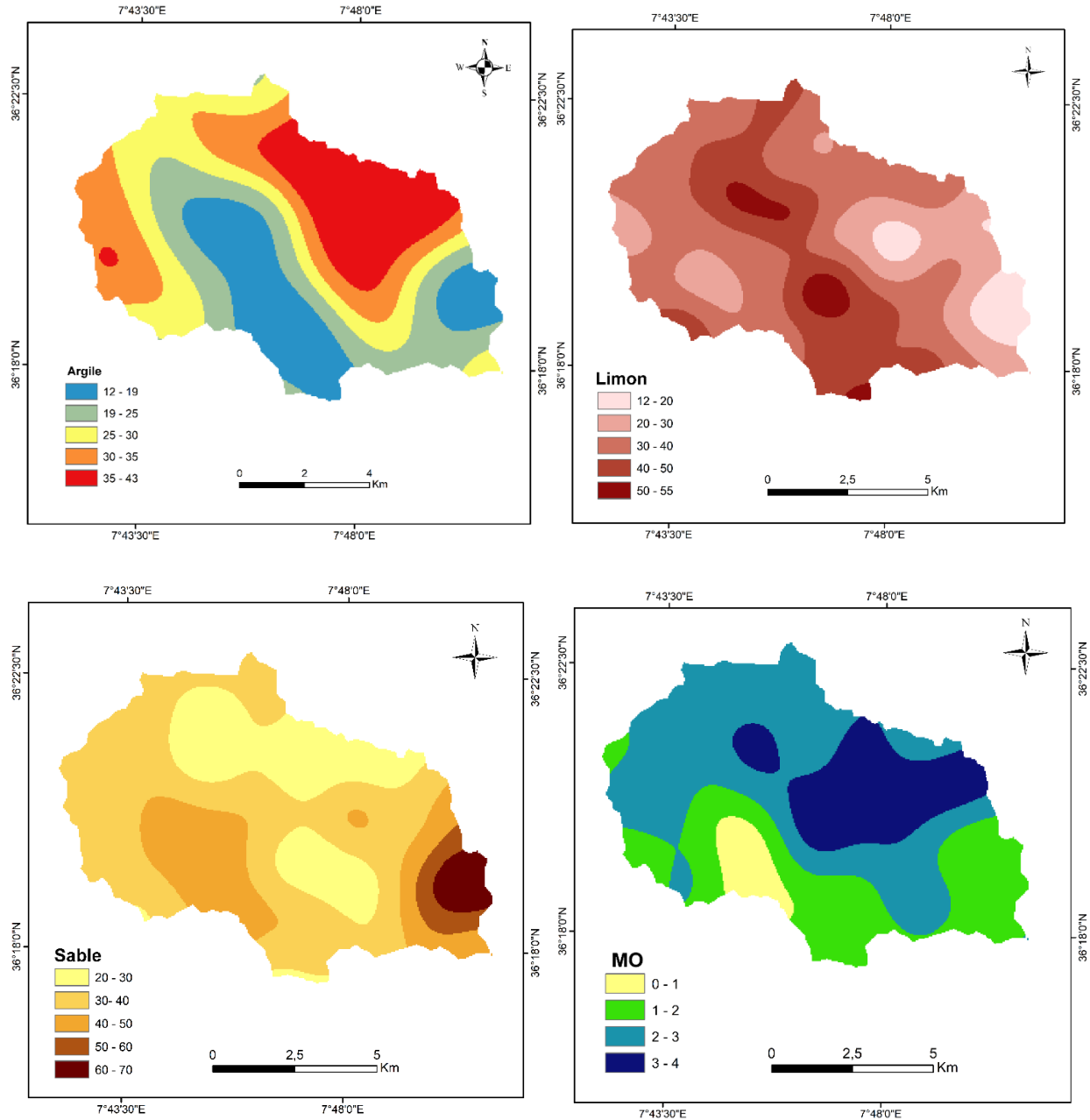


Figure 44. Cartes des propriétés du sol et de la répartition de la matière organique, argile, limon et sable de l’Oued Rhirane.

L'érodabilité des sols est influencée par la texture, où les particules de grande taille résistent à leur transport, tandis que les particules fines résistent au détachement en raison de leur cohésion.

Le coefficient de variation est une mesure importante pour déterminer la variabilité du sol. La variabilité est faible lorsque le coefficient de variation est inférieur ou égal à 15, modérée lorsqu'il se situe entre 15 et 35, et plus variable lorsqu'il est supérieur à 35 (Addis and klik, 2015).

Une grande variabilité des échantillons a été observée. En effet, tous les paramètres du sol mesurés varient considérablement comme l'indiquent les différents coefficients de variation, de 35,37% à 55,48%. Comme indiqué par Liu et al. (2020), les valeurs du coefficient de variation sont considérées comme modérément variables puisqu'elles sont supérieures à 10% et inférieures à 100%. L'argile présente le Cv le plus élevé (55,48%), la matière organique présente aussi une grande variation (avec 54,01%) ; tandis que le limon et le sable varient respectivement de 40,14% et 35,37%. Différentes études ont mentionné que la topographie, la composition granulométrique et les variables anthropogéniques telles que les méthodes agricoles et l'occupation des sols peuvent influencer la variabilité des propriétés spatiales du sol (Benslama et al., 2020).

1.3.2. Sous-bassin versant de l'Oued Melah

L'analyse du sous-bassin versant de l'Oued Melah montre que celui-ci est principalement composé de 33,66 % de sable et de 32,32 % de limon (Tableau 26), cela favorise à un degré un assez bon drainage mis le faible pourcentage d'argile (19,85 %) contribue à réduire la cohésion des particules du sol, ce qui rend le sol plus sensible à l'érosion (Yao et al., 2022).

La teneur en matière organique varie de 0,12 % à 4,17 %, avec une moyenne de 1,84 %, ce qui n'est pas suffisant pour stabiliser le sol. Cette situation, combinée à l'érosion et à l'agriculture intensive, souligne la nécessité de stratégies de gestion durable telles que la rotation des cultures et la couverture végétale pour améliorer la qualité du sol et réduire l'érosion dans cette région délicate.

Les échantillons présentent un degré élevé de variabilité, où les valeurs du coefficient de variation sont considérées comme modérément variables car elles sont supérieures à 10 % mais inférieures à 100 %, L'argile présente le coefficient de variation le plus élevé (56,47 %), tandis que la matière organique montre une forte variation (37,50 %). D'autre part, les limons et les sables montrent des variations plus faibles de 26,45 % et 21,60 % respectivement.

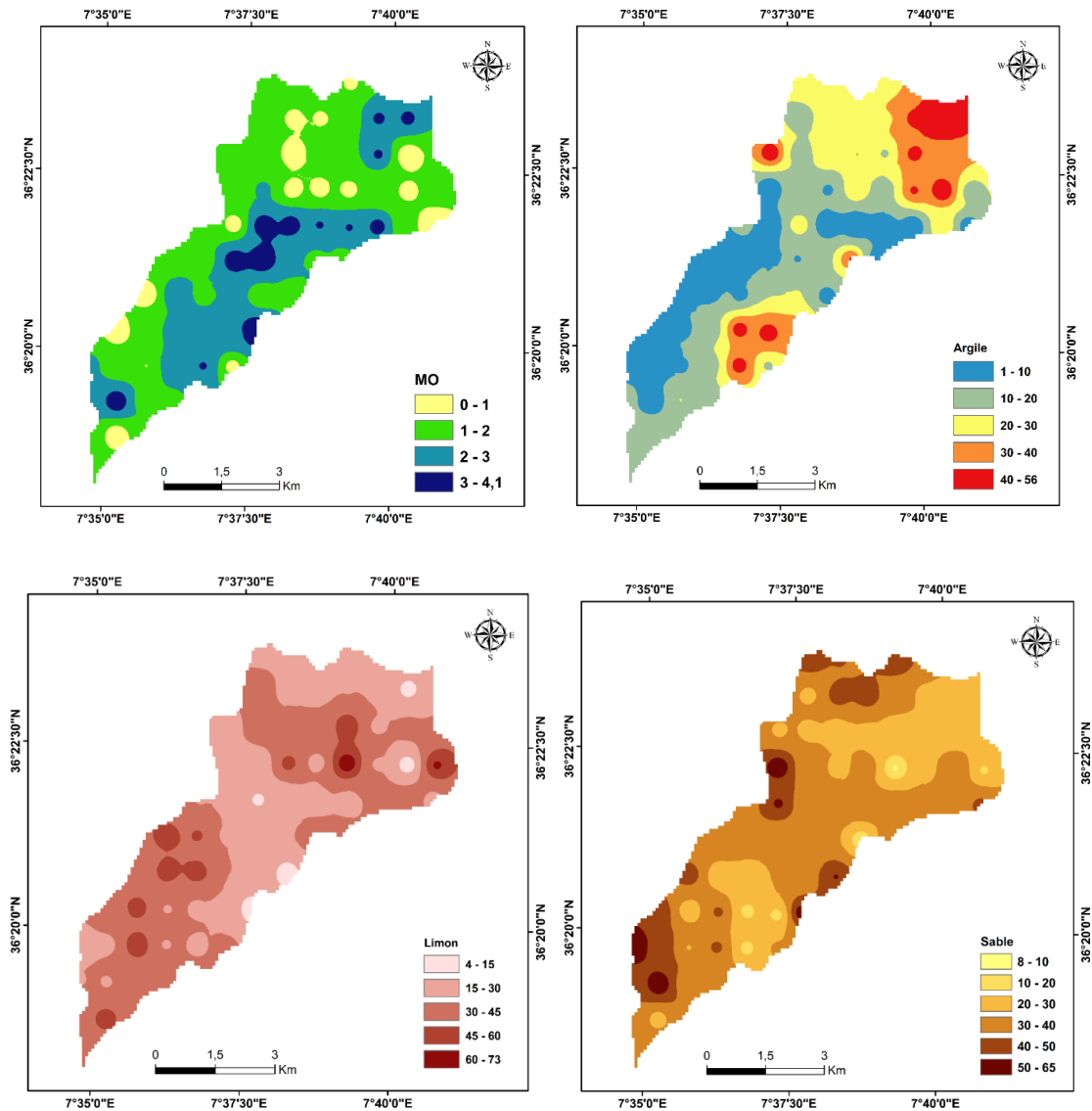


Figure 45. Cartes des propriétés du sol et de la répartition de la matière organique, argile, limon et sable de l’Oued Melah.

Tableau 26. Statistiques descriptives des paramètres du sol du sous-bassin versant de l’Oued Melah.

Paramètres	Argile	Limon	Sable	Mo
Min	1,01	4,19	8,95	0,12
Max	55,67	72,82	65,41	4,17
Moyenne	19,85	32,32	33,66	1,84
Ecart type	11,21	8,55	6,98	0,69
Cv	56,47	26,45	21,60	37,50

CV= coefficient de variation

1.3.3. Sous-bassin versant de l'Oued Bouzerag

L'analyse statistique des propriétés du sol du sous-bassin versant de l'Oued Bouzerag est présentée dans le Tableau 27. Les limons et les sable représentent des valeurs élevées avec 35,60 % et 35,11 %, respectivement ; l'argile représente un faible pourcentage de 11,10 %. La teneur en matière organique varie entre 0,25 % et 4,06 % avec une moyenne de 1,42 %. La teneur en matière organique du sol, qui comprend le carbone organique du sol et d'autres composants de la matière organique, a un impact substantiel sur la stabilité structurelle du sol (Jensen et al., 2019).

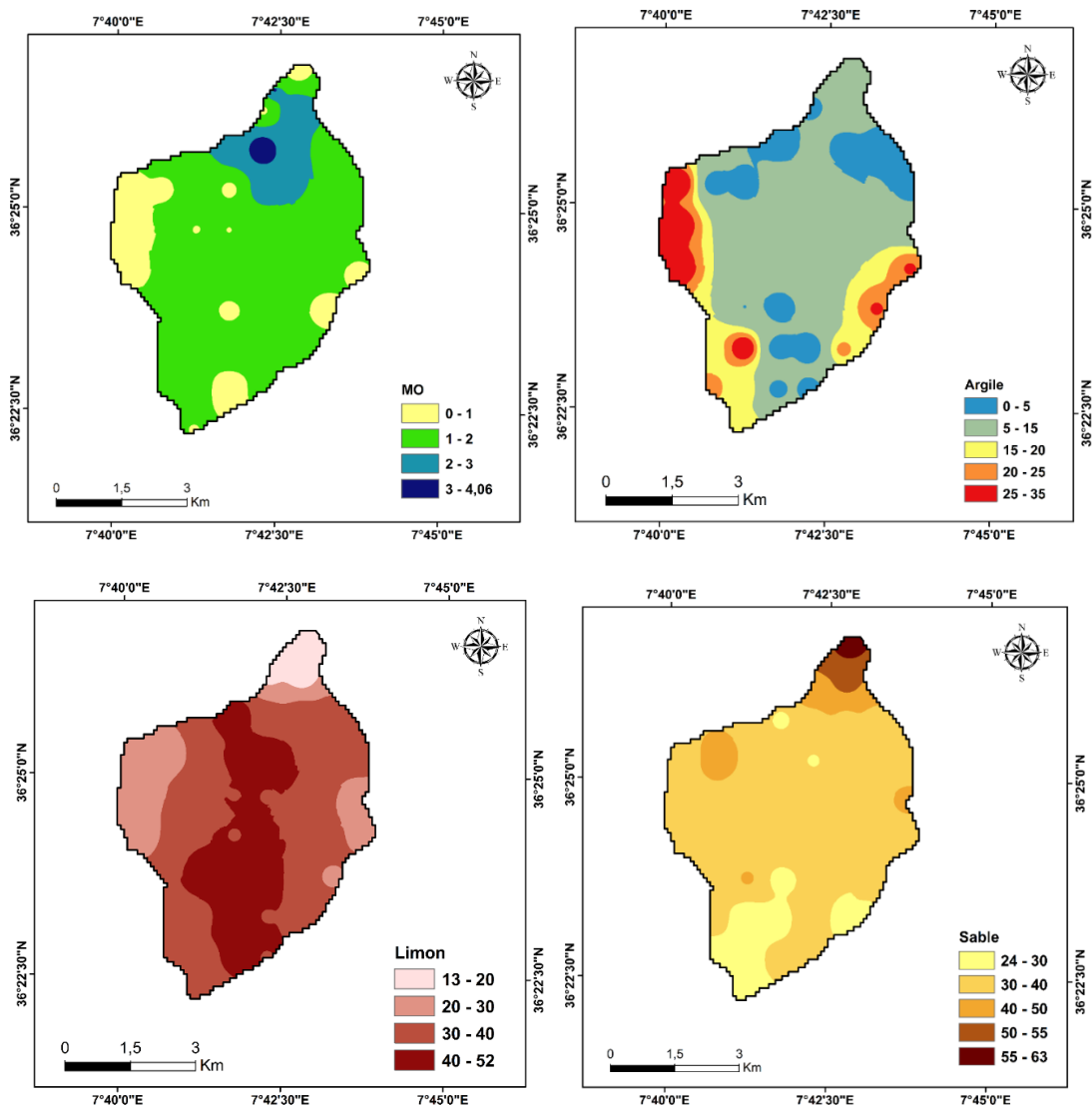


Figure 46. Cartes des propriétés du sol et de la répartition de la matière organique, argile, limon et sable de l'Oued Bouzerag.

La faible teneur en matière organique, causée principalement par l'érosion en nappe et par ravinement dans ces régions, est probablement liée à la morphologie et aux pratiques agricoles intensives qui épuisent le sol.

Tableau 27. Statistiques descriptives des paramètres du sol du sous-bassin versant de l'Oued Bouzerag.

Paramètres	Argile	Limon	Sable	Mo
Min	0,42	13,64	24,22	0,25
Max	34,42	51,68	63,30	4,06
Moyenne	11,10	35,60	35,11	1,42
Ecart type	6,89	7,08	5,39	0,47
Cv	62,07	19,89	15,35	33,10

Les échantillons de sol du sous-bassin versant de l'Oued Bouzerag présentent un degré élevé de variabilité. Selon le tableau 27, l'argile a montré le Cv le plus élevé (62,07%), ce qui indique une grande variation dans sa distribution. La matière organique a montré une variation significative (33,10 %), tandis que les limons (19,89 %) et les sables (15,35 %) présentent une fluctuation moins importante.

Ces résultats indiquent qu'il existe des différences significatives dans les qualités des sols, ce qui peut avoir des implications pour la gestion et le développement des terres au niveau régional. Cette diversité doit être prise en compte lors de l'élaboration de techniques de conservation et de gestion durable des sols.

2. Analyse des paramètres morphométrique

2.1. Relation de surface

2.1.1. Evaluation de la densité de drainage

Les valeurs de la densité de drainage obtenue des sous-bassins versant présentent des valeurs très proches pour les trois sous-bassins versant, le sous-bassin de l'Oued Melah montre une valeur de 1,36 km⁻¹ (Tableau 28) et le sous-bassin Bouzerag avec 1,27 km⁻¹, tandis que le sous-bassin Rhirane présente la valeur la plus élevée 1,57 km⁻¹. Il s'agit de densités de drainage modérées. Le bassin de l'Oued Rhirane présente des roches considérablement imperméables empêchant ainsi l'infiltration de l'eau et augmente le ruissellement de surface.

Tableau 28. Densités de drainage des trois sous-bassins versant.

Sous-bassin	Dd (Km ⁻¹)
Rhirane	1,57
Melah	1,36
Bouzerag	1,27

Le sous-bassin de l'Oued Rhirane est caractérisé par des cultures, des pâturages, des pâturages dégradés et des sols nus. Par conséquent, la diminution de la végétation entraîne une diminution de l'infiltration et une augmentation du ruissellement. Tous ces facteurs ont conduit à la formation d'un ruissellement diffus, qui peut se concentrer pour donner un ruissellement concentré (rigoles et ravines).

2.1.2. Fréquence des talwegs

Les valeurs de fréquence des talwegs (F1) sont très proches pour les trois sous-bassins versants. Le sous-bassin Rhirane a la fréquence la plus faible avec 0,35 km⁻¹, suivi du sous-bassin versant de Melah avec 0,63 km⁻¹, et de Bouzerag avec 0,87 km⁻¹ (Tableau 29).

Tableau 29. Fréquence des talwegs des trois sous-bassins versants.

Sous-bassin	F1 (km ⁻¹)
Rhirane	0,35
Melah	0,63
Bouzerag	0,87

Étant donné que les talwegs donnent aux précipitations des voies d'écoulement, ce qui peut favoriser le ruissellement et le mouvement des sédiments, un sous-bassin versant avec une fréquence de talweg plus élevée Bouzerag (0,87 km⁻¹) montre que le milieu est fracturé fissuré et peut être plus vulnérable à une érosion sévère. Cependant, un sous-bassin versant avec une fréquence de talweg plus faible tel que l'Oued Rhirane (0,35 km⁻¹) peut avoir une structure géologique moins perturbée par la tectonique et une topographie plus adoucie, ce qui pourrait avoir un impact alternatif sur le processus d'érosion du sol dans cette zone. Le bassin de l'Oued Melah quant à lui présente une fréquence des drains intermédiaire, ce qui explique qu'il présente un milieu plus meuble où les cours d'eau sont développés en longueur (ruissellement de surface).

2.2. Relation de relief

2.2.1. Hypsométrie

En se basant sur l'intégrale hypsométrique (HI), nous constatons que les valeurs de l'intégrale hypsométrique varient entre 39,32% et 53,79 % (Tableau 30 et Figure 47).

Tableau 30. Hypsométrie des trois sous-bassin versants.

Bassin	HI %	Maturité	Courbe
Rhirane	43,04	Mi-maturité	Concavo-convexe
Melah	39,32	Fin maturité	Concave plus allongé vers le bas
Bouzerag	53,79	Début-maturité	Concavo-convexe

Le sous-bassin versant de l'Oued Rhirane a une forme concavo-convexe (voir figure 47) avec une valeur de l'intégrale hypsométrique de 43,04 % (Tableau 30), ce qui indique que le développement du bassin versant a atteint un stade de mi-maturité avec un relief bien développé et une plaine bien différenciée.

Le sous-bassin versant de l'Oued Melah a également une forme concavo-convexe avec une valeur de l'intégrale hypsométrique de 39,32%, de ce fait ce bassin a légèrement dépassé le stade de mi-maturité et se dirige vers la fin-maturité avec une énergie d'érosion moins intense et un relief moins abrupt. Entre autres, on trouve presque 61% du volume montagneux qui a été consommé par l'érosion. Ce bassin est caractérisé par une prédominance de collines éparses, généralement moyennes à basses et des sommets de collines souvent arrondis.

Le sous-bassin de l'Oued Bouzerag a une forme plus convexe vers le bas, avec une intégrale hypsométrique de presque 54%, suggérant qu'il est dans un stade de début-maturité où uniquement 46% du volume montagneux a été consommé par le phénomène de l'érosion. Ainsi, ce bassin reste encore sujet à une érosion active où l'équilibre du rapport transport de sédiment/érosion n'est encore atteint.

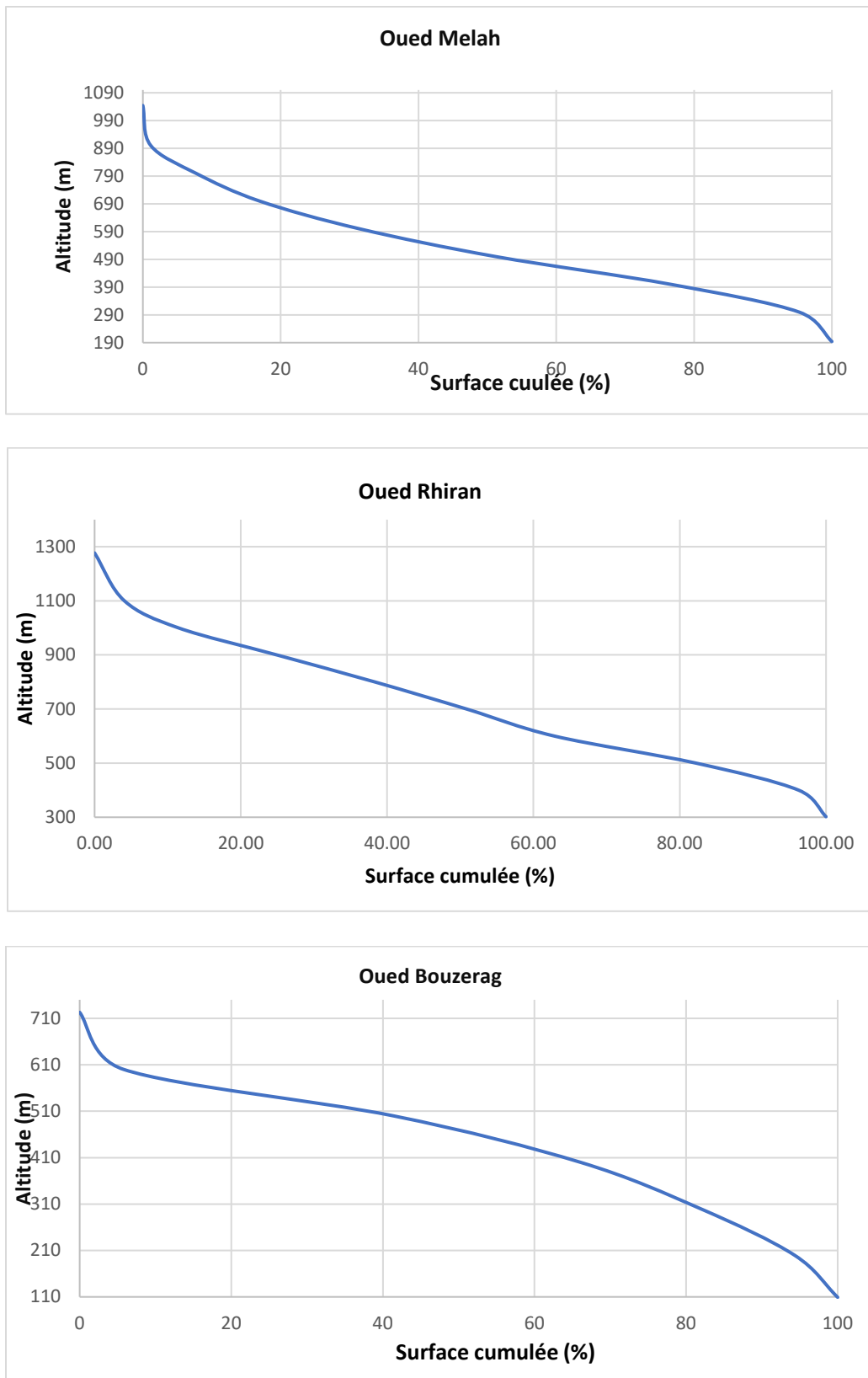


Figure 47. Courbes hypsométriques des trois sous-bassins de la zone d'étude.

3. Analyse de l'érodibilité des sols (Facteur K)

Après exclusion des valeurs aberrantes liées aux attributs du sol et de facteur K, la distribution des ensembles de données sur les sols est devenue comparable à la distribution normale dans le sous-bassin versant de l'Oued Rhirane, ce qui indique qu'ils répondent aux exigences d'un processus stationnaire ou quasi-stationnaire dans l'analyse géostatistique. À titre d'exemple, l'indice d'asymétrie K a diminué de 0,773 (avant exclusion des valeurs aberrantes) à 0,557 (sans valeurs aberrantes). Des échantillons de sol provenant de 132 (sous-bassin de l'Oued Rhirane) endroits sont nécessaires pour détecter correctement l'anisotropie, ce qui signifie qu'il n'est pas possible d'explorer les effets directionnels pour l'ensemble des données liées à cette étude. Étant donné que les modèles de variogramme sont supposés suivre l'isotropie, seuls les modèles de variogramme isotropes sont pris en compte dans cette étude.

Nous avons découvert que les données de l'argile, de limon et de sable des sous-bassins versants de l'Oued Melah et de l'Oued Bouzerag ne suivaient pas une distribution normale lorsque les valeurs aberrantes étaient supprimées. Étant donné que le krigeage ordinaire exigeant que les données suivent une distribution normale, nous avons opté pour la méthode de pondération par l'inverse de la distance (IDW).

3.1. Sous-bassin de l'Oued Rhirane

La distribution spatiale de l'érodibilité du sol à l'aide de l'analyse géostatistique (Krigage ordinaire) montre différentes classes du facteur K (Figure 48).

Les valeurs de l'erreur ME sont proches de 0 avec une valeur de $-2,376537 \times 10^{-5}$ et l'erreur RMSE de la carte d'interpolation K est égale à 0,0067, ce qui explique que les valeurs prédites sont proches des valeurs mesurées, donnant ainsi une bonne prédiction. L'erreur quadratique moyenne relative (EQMR) est l'erreur quadratique moyenne normalisée par la valeur quadratique moyenne où chaque résidu est mis à l'échelle par rapport à la valeur réelle. Elle indique une valeur de 10,88 %, se situant entre 10 % et 20 %, ce qui démontre la bonne précision et l'adéquation de l'estimation K par le krigeage.

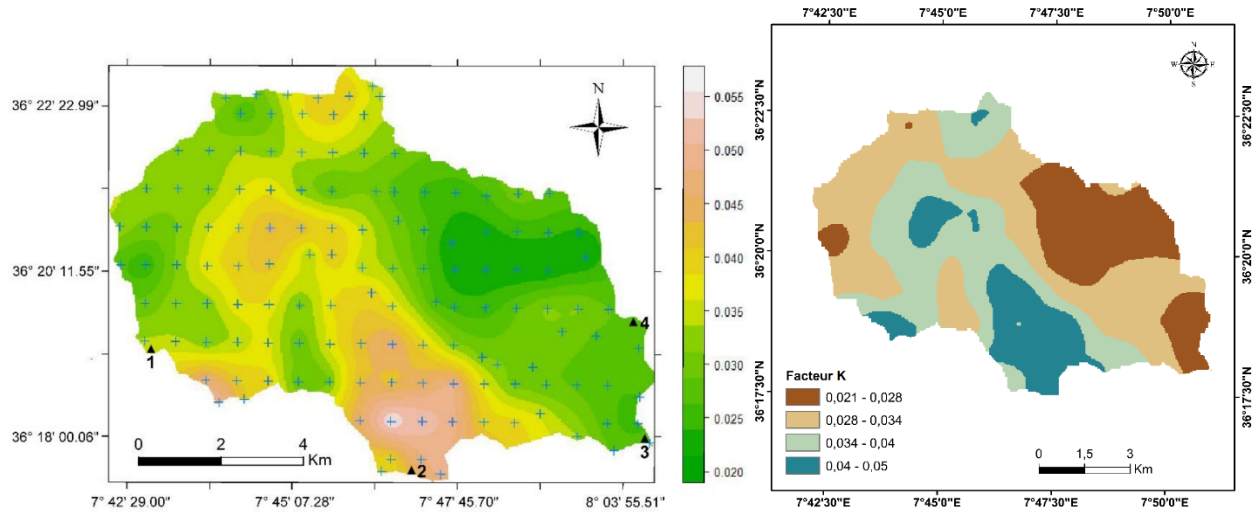


Figure 48. Facteur d'érodibilité du sol du sous-bassin versant de l'Oued Rhirane.

Le facteur K du sous-bassin versant de l'Oued Rhirane varie de 0,020 à 0,055 t ha MJ-1 mm-1 dans la zone d'étude.

Les valeurs les plus faibles ont été principalement observées dans la partie Est du sous-bassin avec une légère sensibilité à l'érosion (0,007 à 0,03) et qui occupe 31,29% (25,29 km²) de la zone du sous-bassin (Tableau 31). La région est dominée par des arbustes et des pâturages sur des surfaces principalement modérément inclinées. L'utilisation des terres se développe sur des sols à forte teneur en sable et en argile, dont la matière organique varie entre 1 et 4 % (Figure 48). Toutefois, les valeurs de K dans la région Ouest sont mineures par rapport à l'Est, où la zone est occupée par des arbustes et des cultures clairsemés. Contrairement au Sud-Ouest, la région Nord-Ouest est caractérisée par des teneurs élevées en matière organique et en argile (utilisation de terres cultivées). La valeur moyenne de K est égale à 0,03.

Tableau 31. Répartition des classes d'érodibilité (K) du sous-bassin de l'Oued Rhirane.

Classes	S (km ²)	S (%)
0,007 - 0,03	25,29	31,29
0,03 - 0,04	42,87	53,04
0,04 - 0,055	12,67	15,67

En général, dans les sols de la zone d'étude, la fraction argileuse est la clé de l'érodabilité ainsi que la matière organique. Un pourcentage plus élevé de matière organique a été observé dans la partie Nord-est de la zone d'étude, dépassant les 2%. Comme le sol a une teneur élevée en matière organique, les agrégats sont plus stables, ce qui minimise la susceptibilité du sol au détachement et

améliore l'infiltration. En outre, une teneur élevée en matière organique minimise la susceptibilité du sol à la perte et favorise l'infiltration.

Les sols jugés modérément sensibles à l'érosion (0,03-0,04) occupent 53,04 % (42,87 km²) et sont répartis sur l'ensemble du bassin versant, à l'exception de la zone centre-Sud (Figure 48). La zone Sud-Est est caractérisée par des prairies et des arbustes clairsemés là où les pentes sont abruptes. Le sol présente des textures limoneuses et argileuses et la croissance et la distribution des racines des plantes sont donc moins importantes que dans la partie Nord-Est.

Vers le centre et l'aval, les terres agricoles sont caractérisées par des sols limoneux et argilo-limoneux. Il y a une réduction significative de la matière organique du sol, principalement dans la zone Sud, Sud-Ouest. Les zones à forte teneur en matières organiques sont étroitement liées à la pratique de gestion de l'ajout d'amendements organiques pour les cultures. Cependant, les pratiques de travail du sol, les techniques de plantation et la gestion des résidus sont responsables de la diminution des matières organiques dans l'agriculture. Cette situation a influencé la capacité des sols à résister à l'érosion, comme l'a montré l'apparition de glissements de terrain et de ravinements.

Les niveaux d'érodabilité élevés à très élevés, qui occupent 12,67 km², sont dus à la texture du sol, avec de faibles pourcentages d'argile et de matière organique, et à la présence de la pente. L'analyse granulométrique a montré l'influence importante de la teneur en limon et en sable fin sur le facteur d'érodabilité (Carlos et Odette, 2012). La zone très sensible à l'érosion est principalement située dans le Sud du bassin d'étude, qui comprend des terres cultivées utilisant des pratiques agricoles inappropriées sur des surfaces modérées à abruptes, telles que le labourage dans le sens de la pente. En outre, les sols développés sur les Cambisols Calciques ont tendance à présenter une faible résistance à la décomposition et une perméabilité modérée à faible, démontrant la grande sensibilité du sol contre l'érosion avec le plus faible pourcentage d'agrégats d'argile.

Nos résultats ont révélé que la distribution spatiale du facteur K peut être influencée par les caractéristiques topographiques du bassin d'étude, les différentes utilisations du sol, les pratiques culturales et les propriétés physiques de la couche arable. Compte tenu de l'impact de l'érosion sur la stabilité et la qualité des sols, des mesures importantes doivent être prises afin de réduire la dégradation des sols et de favoriser une production alimentaire sûre.

3.2. Sous-bassin versant de l'Oued Melah

Les valeurs de l'erreur moyenne (ME) sont proches de 0, avec une valeur de 0,00025. En outre, l'erreur quadratique moyenne (RMSE) de la carte d'interpolation K est de 0,00157. Cela indique que les valeurs prédites sont très proches des valeurs mesurées, ce qui donne une prédiction précise. Le coefficient de corrélation entre les valeurs mesurées et estimées est de 0,43, ce qui démontre la précision et l'efficacité de l'estimation K par krigeage.

Selon la carte du facteur K (Figure 49), le sous-bassin présente différents niveaux de sensibilité à l'érosion, avec une moyenne de K égale à 0,05. Les valeurs du facteur K les plus faibles sont réparties sur des petites parcelles dans les parties Nord-Est et centre-Sud du sous-bassin, indiquant une sensibilité modérée à l'érosion. Ces zones couvrent environ 18,41 % (7,37 km²) (Tableau 32) de la superficie du sous-bassin. La partie centrale de ces zones est principalement caractérisée par des cultures agricoles et des maquis denses, avec des sols contenant des quantités importantes de sable et d'argile, et des niveaux de matière organique variant de 1 à 4 %.

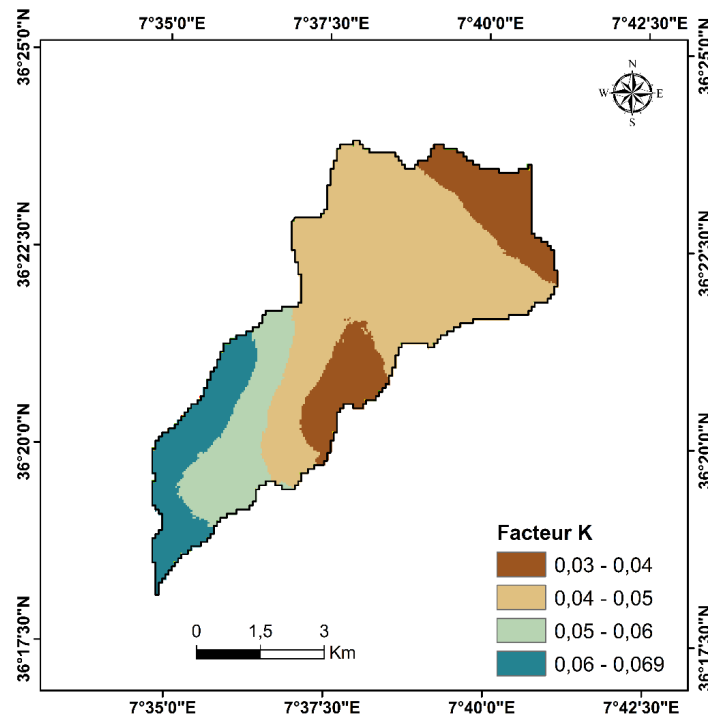


Figure 49. Facteur d'érodibilité du sol du sous-bassin versant de l'Oued Melah.

Tableau 32. Répartition des classes d'érodibilité (K) du sous-bassin de l'Oued Melah.

Classes	S (km ²)	S (%)	Moyenne
0,03 - 0,04	7,37	18,41	0,037
0,04 - 0,05	21,77	54,40	0,045
0,05 - 0,06	5,57	13,91	0,056
0,06 - 0,07	5,32	13,28	0,063

La plus grande partie du sous-bassin, représentant 54,40 % (21,77 km²), est composée de sols classés comme modérément sensibles à l'érosion, avec des valeurs de facteur K comprises entre 0,04 et 0,05. Ces sols sont principalement situés dans la région centrale du bassin versant, s'étendant du Nord au Sud. La couverture végétale prédominante dans cette zone comprend des cultures et des maquis dégradées, avec des sols à nature limoneuse et argileuse.

Les classes d'érodabilité élevés à très élevés, classes de (0,05 - 0,06) et (0,06 - 0,07) occupent une surface de 13,91% et 13,28% respectivement. Ces classes de sensibilité accrue à l'érosion est attribuée à des facteurs tels que la texture du sol, caractérisée par une faible teneur en argile et en matière organique, et la présence de pentes raide. Ces zones à forte érodibilité sont principalement situées dans la partie Sud-Ouest du bassin, où les terres cultivées utilisent souvent des pratiques agricoles inappropriées sur des pentes modérées à fortes, telles que le labourage dans le sens de la pente. En outre, ces régions se caractérisent par des broussailles dégradées et des sols nus, qui contribuent à augmenter le risque d'érosion (Wischmeier & Smith, 1978).

3.3. Sous-bassin versant de l'Oued Bouzerag

Les valeurs de l'erreur moyenne (ME) sont proches de zéro, avec une valeur mesurée de 0,00026. En outre, l'erreur quadratique moyenne (RMSE) de la carte d'interpolation K est de 0,0012. Cela indique que les valeurs prédites s'alignent étroitement sur les valeurs mesurées, ce qui démontre un niveau élevé de précision dans les prédictions. Le coefficient de corrélation est de 0,5, illustrant ainsi la précision et l'efficacité de l'estimation K par krigeage.

La carte de la répartition spatiale du facteur d'érodibilité du sol du sous-bassin versant de l'Oued Bouzerag est représenté dans la figure 50 (Kmoyen = 0,06). Une analyse spatiale détaillée du facteur K a révélé des variations significatives de l'érodibilité, allant de 0 à 0,097 t ha MJ-1 mm-1 (Tableau 33). Les valeurs d'érodabilité les plus faibles (0 - 0,03) se trouvent dans une petite partie, couvrant seulement 4,88% de la superficie totale du bassin. Cette catégorie comprend

principalement des sols sableux à faible teneur en matière organique, en limon et en argile, qui contribuent à une macroporosité et à une perméabilité favorable.

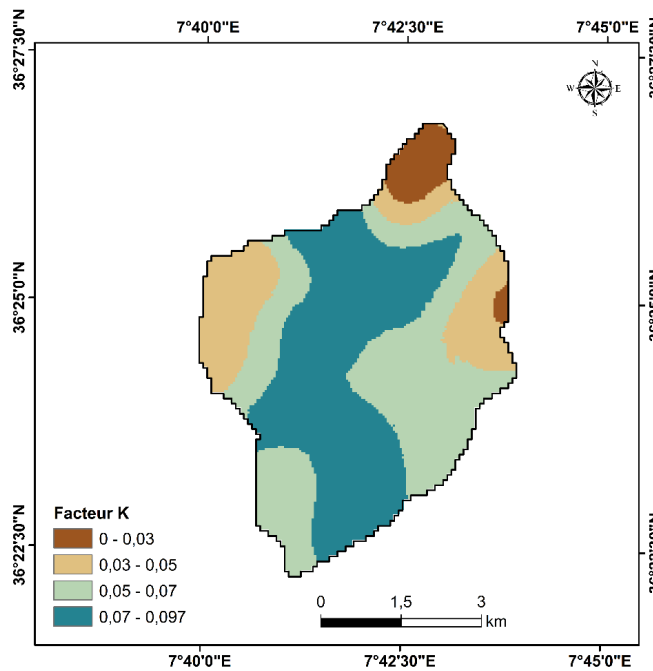


Figure 50. Facteur d'érodibilité du sol du sous-bassin versant de l'Oued Bouzerag.

Tableau 33. Répartition des classes d'érodibilité (K) du sous-bassin de l'Oued Bouzerag.

Classes	S (km ²)	S (%)	Moyenne
0 - 0,03	1,46	4,88	0,022
0,03 - 0,05	13,75	46,05	0,052
0,05 - 0,07	2,58	8,64	0,067
0,07 - 0,097	12,07	40,43	0,080

La classe d'érodibilité modérément sensible (0,03 - 0,05) englobe une partie substantielle du sous-bassin, représentant 46 % de la surface totale, soit 13,75 km². Cette catégorie est prédominante dans les régions Nord, Est et Ouest du bassin, caractérisée par un maquis dégradé et un maquis clairsemé. Selon Aranda et Oyonarte (2005), une végétation dégradée peut entraîner une dégradation des sols, tandis qu'une végétation développée produit des matières organiques plus évoluées et plus stables, ce qui est bénéfique pour la préservation des sols contre l'érosion.

Les niveaux d'érodibilité les plus élevés (0,07 - 0,097) sont présents sur 40,43 % de la superficie totale du sous-bassin. Cette sensibilité accrue est principalement attribuée à la texture du sol, caractérisée par une faible teneur en argile et une forte proportion de limon, associées à de

faibles teneurs en matières organiques. De plus, la présence de pentes supérieures à 15 % accentue ce phénomène. Cette classe s'étend du Nord au Sud du bassin, englobant principalement des zones de culture, de maquis dégradé et de pâturages, ce qui accroît le risque d'érosion. En effet selon Guo et al., (2021), la présence de pentes à un impact considérable sur l'érodabilité du sol, les caractéristiques du sol et les caractéristiques des racines des plantes jouant un rôle important dans la détermination de l'érodabilité des sols.

Relations entre l'érodabilité du sol et les propriétés physico-chimiques

En analysant des ensembles de données sur le sol, on remarque que l'érodabilité (ou érodabilité) du sol diminue à mesure que la teneur en sable augmente ($r = -0,13$ à $-0,68$). La relation inverse modérée est plus observée dans le bassin de l'Oued Bouzerag, avec $r = -0,68$ (Tableau 34).

Egalement, Nous avons trouvé une tendance assez faible entre la teneur en argile et le facteur d'érodabilité à l'Oued Melah et l'Oued Bouzerag (r est de $-0,37$ et $-0,43$). Le coefficient de corrélation entre l'érodabilité et la teneur en limon est plus élevé dans les trois bassins que pour les autres particules du sol ($r \geq 0,63$). Semblables à nos résultats, Zhang et al. (2004) ont trouvé une corrélation négative et significative entre l'érodabilité du sol et la teneur en argile.

Selon la littérature, la plus grande vulnérabilité à l'érosion hydrique se produit là où les sols sont majoritairement limoneux (Bonilla et Johnson, 2012 ; Zhang et al., 2004). Les particules de limon ont une faible force de cohésion et sont facilement transportées par ruissellement ; ils sont donc plus vulnérables à l'érosion hydrique. D'autre part, la présence de particules de sable dans le sol provoque une augmentation des macropores, une infiltration d'eau et, par conséquent, une diminution de la susceptibilité à l'érosion et au détachement des sédiments (Santos et al., 2003). De plus, les particules du sol ayant des diamètres approchant ceux du limon, du sable fin et très fin sont plus facilement érodées.

Tableau 34. Matrices de corrélation entre l'érodibilité du sol et les paramètres physico-chimiques.

Od Rhirane							
Variabes	Argile (%)	Limon (%)	Sable (%)	MO (%)	Structure.	Perméabilité	K
Argile (%)	1	-	-	-	-	-	-
Limon (%)	-0,16	1	-	-	-	-	-
Sable (%)	-0,32	-0,69	1	-	-	-	-
MO (%)	0,35	0,05	-0,22	1	-	-	-
Structure	-0,01	0,27	-0,35	0,22	1	-	-
Perméabilité	0,88	-0,04	-0,46	0,36	0,07	1	-
K	-0,56	0,63	-0,16	-0,32	-0,40	-0,41	1
Od Melah							
Argile (%)	1	-	-	-	-	-	-
Limon (%)	-0,43	1	-	-	-	-	-
Sable (%)	-0,55	-0,22	1	-	-	-	-
MO (%)	0,06	-0,22	-0,18	1	-	-	-
Structure	0,86	-0,32	-0,52	-0,02	1	-	-
Perméabilité	0,87	-0,38	-0,58	0,25	0,75	1	-
K	-0,37	0,93	-0,13	-0,41	-0,22	-0,34	1
Od Bouzerag							
Argile (%)	1	-	-	-	-	-	-
Limon (%)	-0,36	1	-	-	-	-	-
Sable (%)	-0,23	-0,68	1	-	-	-	-
MO (%)	-0,16	0,02	0,07	1	-	-	-
Structure	0,56	0,04	-0,48	-0,3	1	-	-
Perméabilité	0,7	0,19	-0,67	-0,22	0,84	1	-
K	-0,43	0,96	-0,68	-0,14	-0,16	0,2	1

Wischmeier et Mannering (1969) ont constaté que la teneur en sol des eaux de ruissellement était inversement proportionnelle à la teneur en matière organique. Leur analyse des classes texturales des limons, des loams limoneux, des loams et des loams sableux a montré que la relation inverse entre l'érodibilité et le niveau de matière organique était forte, mais elle diminuait de manière significative à mesure que la fraction d'argile devenait plus grande (Tableau 34). Cependant, la relation établie dans les bassins étudiés entre K et la teneur en matière organique est négative mais elle n'est pas si forte, notamment dans le bassin de l'Oued Bouzerag ($r = -0,14$). Ceci est dû principalement aux conditions géomorphologiques et/ou le taux de recouvrement végétal qui produisent des changements dans la nature et la répartition de la matière organique. Toutefois, il reste que les bassins de l'Oued Bouzerag et l'Oued Melah sont les plus touchés par l'érosion

hydrique ($K = 0,06$ à $0,05$), et ce en se basant sur les valeurs de l'érodibilité du sol. La fréquence des drains coïncide parfaitement avec les résultats portant sur l'érodibilité du sol (K) dont le nombre important des talwegs a provoqué le développement d'un réseau hydrographique dense favorisant le ruissellement et donc la dégradation du sol.

4. Analyse de l'érosion avec le modèle RUSLE

4.1. Estimation du facteur d'érosivité des pluies (R)

4.1.1. Sous-bassin versant de l'Oued Rhirane

La carte du facteur R du sous-bassin versant de l'Oued Rhirane (Figure 51), montre que l'érosivité des précipitations dans la zone d'étude varie de $33,89$ à $36,85$ $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{hr}^{-1} \text{yr}^{-1}$, avec une valeur moyenne de $35,40$ $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{hr}^{-1} \text{yr}^{-1}$. La répartition spatiale des valeurs R montre une variation dans l'ensemble du sous-bassin versant, la partie Sud-Est étant plus érosive couvrant une grande surface de $26,81\%$ (Tableau 35). Cette région est caractérisée par des montagnes et des pentes raides, qui amplifient l'impact de l'érosion par les précipitations, et les pentes raides favorisent un ruissellement rapide ; ce qui augmente le potentiel d'érosion car l'eau emporte les particules du sol. En effet, les précipitations renforcent la formation des rigoles et augmentent l'érosion en rigole sur les pentes raides, en particulier lorsque les débits des précipitations sont élevés (Tian et al., 2007).

À l'inverse, en allant vers la partie centrale et Ouest du sous-bassin, où le relief est plus modéré, l'érosivité diminue progressivement. Cette réduction de l'intensité du ruissellement suggère que l'impact des précipitations sur la perte de sol est moins prononcé dans cette zone.

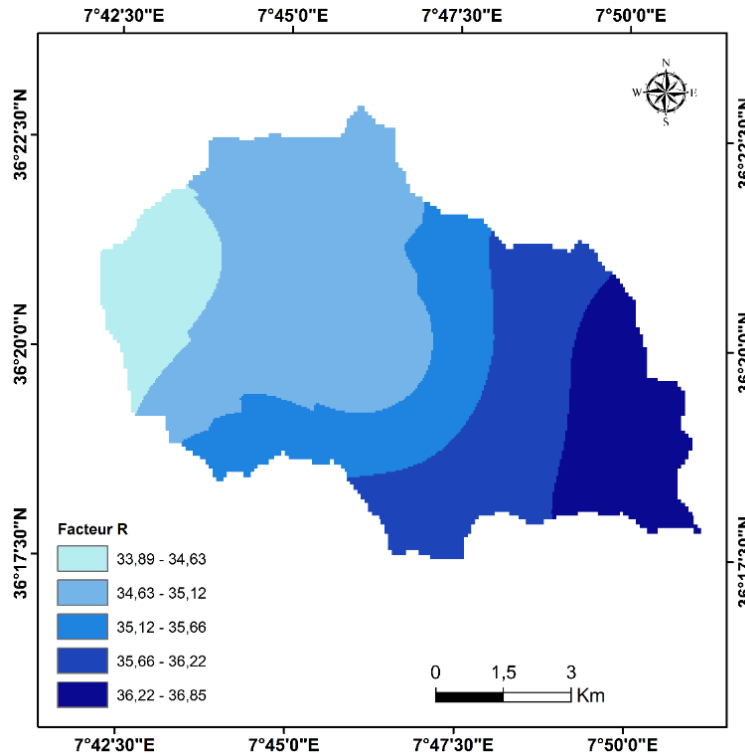


Figure 51. Carte du facteur d'érosivité des pluies (R) du sous-bassin de l'Oued Rhirane.

Tableau 35. Répartitions des classes du d'érosivité des pluies (R) du sous-bassin de l'Oued Rhirane.

Classes du facteur R	Surface (km ²)	Surface (%)	Moyenne
33,89 - 34,63	14,36	17,96	35,19
34,63 - 35,12	15,26	19,09	35,30
35,12 - 35,66	12,37	15,47	35,38
35,66 - 36,22	16,53	20,67	35,46
36,22 - 36,85	21,43	26,81	35,46

4.1.2. Sous-bassin versant de l'Oued Melah

La carte du facteur R pour le sous-bassin de l'Oued Melah (Figure 52) indique que l'érosivité des précipitations varie de 32,90 à 33,85 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ y⁻¹ (Tableau 36), avec une moyenne de 35,40 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ y⁻¹. Ces valeurs relativement homogènes indiquent que les précipitations dans ce sous-bassin ont un potentiel érosif modéré. Les zones situées au Nord-Est et Sud du sous-bassin versant présentent des valeurs d'érosivité plus élevée couvrant une faible surface de 8,03% de la surface du sous-bassin, qui diminue ensuite vers le centre et l'Ouest du sous-bassin versant.

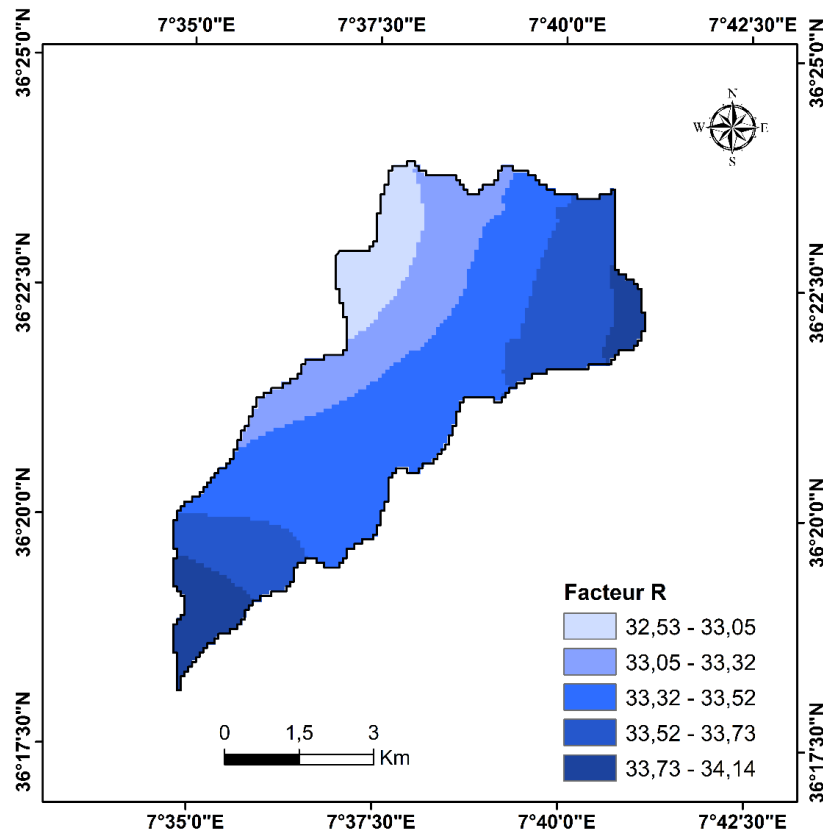


Figure 52. Carte du facteur d'érosivité des pluies (R) du sous-bassin de l'Oued Melah.

Tableau 36. Répartitions des classes d'érosivité des pluies (R) du sous-bassin de l'Oued Melah.

Classes du facteur R	Surface (km ²)	Surface (%)	Moyenne
32,53 - 33,05	3,19	8,07	32,90
33,05 - 33,32	7,42	18,77	33,21
33,32 - 33,52	17,19	43,48	33,43
33,52 - 33,73	8,56	21,64	33,62
33,73 - 34,14	3,17	8,03	33,85

4.1.3. Sous-bassin versant de l'Oued Bouzerag

La carte du facteur d'érosivité des pluies (R) est représentée dans la figure 53. Selon le tableau 37, le sous-bassin versant de l'Oued Bouzerag montre que l'érosivité des précipitations varie entre 33,47 et 34,64 MJ mm ha⁻¹ hr⁻¹ an⁻¹, avec une valeur moyenne de 34,07 MJ mm ha⁻¹ hr⁻¹ an⁻¹.

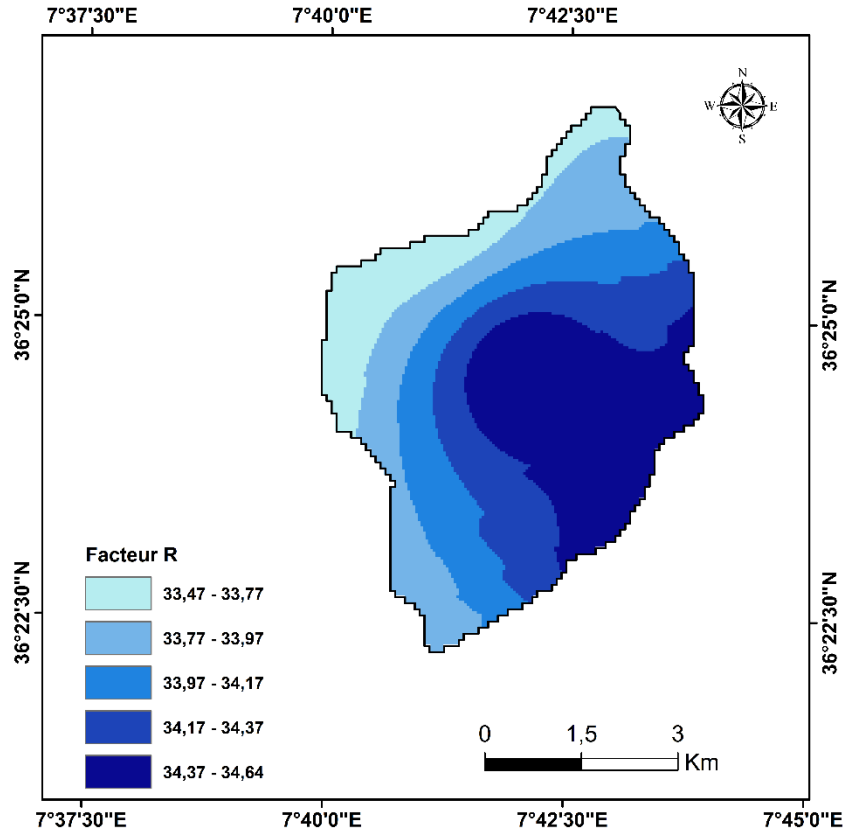


Figure 53 . Carte du facteur d'érosivité des pluies (R) du sous-bassin de l'Oued Bouzerag.

Tableau 37. Répartitions des classes d'érosivité des pluies (R) du sous-bassin de l'Oued Bouzerag,

Classes du facteur R	Surface (km ²)	Surface (%)	Moyenne
33,47 - 33,77	3,85	12,90	33,66
33,77 - 33,97	6,07	20,30	33,88
33,97 - 34,17	5,46	18,28	34,07
34,17 - 34,37	5,79	19,37	34,28
34,37 - 34,64	8,71	29,15	34,48

Lorsque les précipitations annuelles moyennes d'une station augmentent, l'érosivité du ruissellement pluvial de la station augmente également, et vice versa. Selon Wang et al. (2017), l'augmentation de l'érosion annuelle due aux précipitations et au ruissellement est liée à une quantité plus importante de précipitations ainsi qu'à son intensité.

Les valeurs de R augmentent de l'Est à l'Ouest du bassin versant, ce qui indique que la contribution spatiale du facteur R à la perte de sol mérite être sérieusement considérée.

Les variations légères observées dans les trois sous-bassins versants témoignent d'une influence climatique assez stable, avec des précipitations qui, bien qu'elles ne soient pas extrêmement intenses, peuvent tout de même générer un certain degré d'érosion, particulièrement dans les zones plus sensibles ayant des pentes raides ou les sols non protégés par la végétation. Il sera donc crucial de prendre en compte la topographie et l'état de la couverture végétale pour mieux évaluer l'impact global de ces précipitations sur l'érosion dans le sous-bassin.

4.2. Estimation du facteur LS

4.2.1. Sous-bassin versant de l'Oued Rhirane

La carte du facteur LS réalisée avec le logiciel SAGA-GIS est représentée dans la figure 54,

Les valeurs LS obtenues sont regroupées en cinq classes comprises entre 0 et 319,41 (Tableau 38) avec une valeur moyenne de 20,06. Le facteur LS et la pente sont des facteurs décisifs dans la formation de surfaces érosives, contribuant à l'érosion du sol (Petlušová et al., 2021).

La classe des valeurs (>25) considérée comme très forte domine avec 26,68 % de la surface du sous-bassin versant, localisée dans les zones montagneuses à forte pente. Par conséquent la classe faible de (0 -5), localisée dans la zone des plaines, n'occupe que 18,26 % de la surface du sous-bassin.

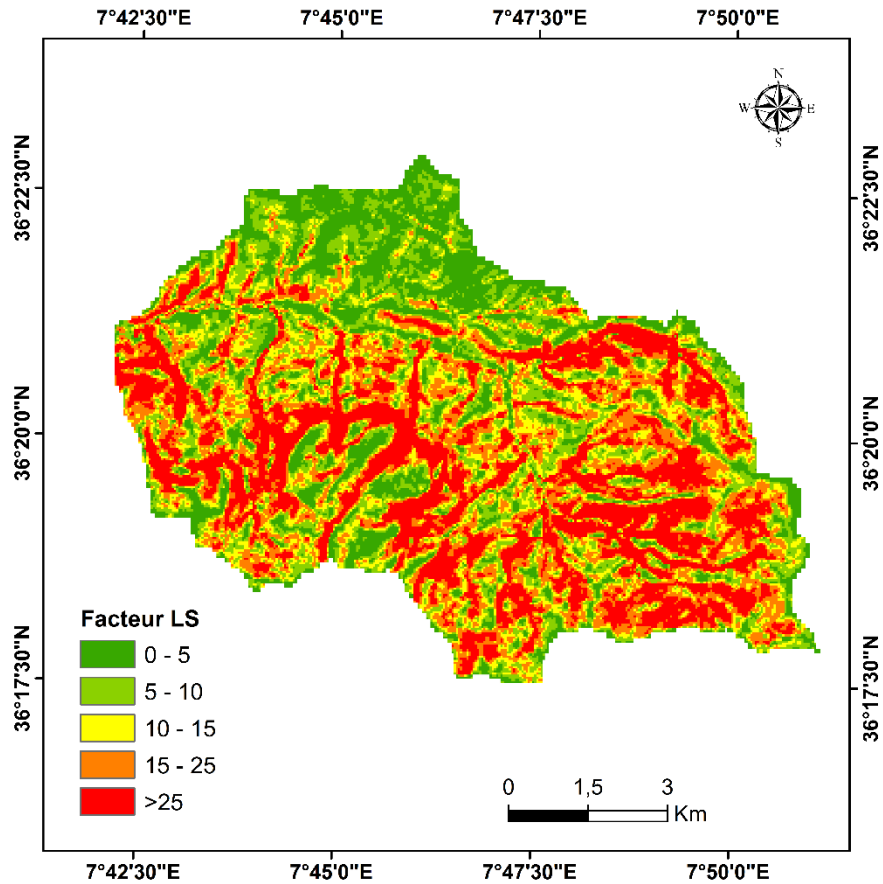


Figure 54. Carte du facteur LS du sous-bassin de l’Oued Rhirane.

Tableau 38. Répartition des classes des pentes du sous-bassin de l’Oued Rhirane.

Classes des pentes	Surface (km ²)	Surface (%)	Moyenne
0 - 5	14,69	18,26	2,76
5 - 10	15,33	19,07	7,41
10 - 15	12,40	15,41	12,41
15 - 25	16,55	20,58	19,52
>25	21,45	26,68	45,76

4.2.2. Sous-bassin versant de l’Oued Melah

D'après le tableau 39, les zones présentant les valeurs LS les plus élevées, supérieures à 25, qui sont confinées dans la classe aux valeurs très fortes, qui couvrent une grande superficie de 21,14 % de la surface totale. Ces zones sont principalement situées sur des pentes et des crêtes abruptes (Figure 55). Le relief accidenté de ces zones, avec leurs pentes raides, favorise un fort ruissellement de l'eau, ce qui augmente considérablement le potentiel d'érosion du sol. Les pentes raides entraînent une érosion importante du sol en raison de l'énergie cinétique attribuée à l'eau

d'acquérir une grande vitesse pour le creusement des surfaces surtout vulnérables, ainsi que la dépendance des processus hydrauliques complexes entre la pluie et le ruissellement (Li et al., 2020). Les classes de valeurs faibles et élevées occupent presque la même superficie, avec respectivement 21,72 % et 21,65 %.

En revanche, les valeurs les plus faibles (0 - 5) couvrent 18,17 % de la surface et se trouvent souvent dans les plaines et les plateaux à faible pente. Dans ces zones, l'eau s'écoule beaucoup plus lentement, ce qui réduit le risque d'érosion. Les pentes douces de ces zones favorisent une meilleure rétention d'eau et offrent une protection naturelle contre l'érosion hydrique.

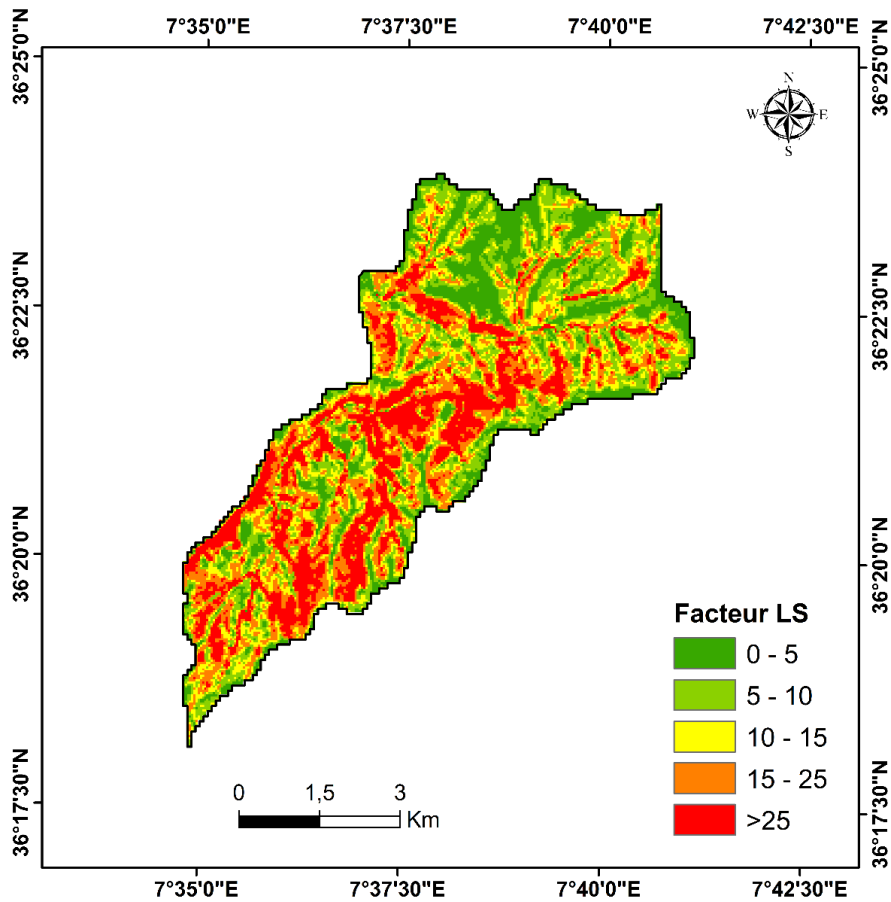


Figure 55. Carte du facteur LS du sous-bassin de l'Oued Melah.

Tableau 39. Répartition des classes des pentes du sous-bassin du sous-bassin l’Oued Melah.

Classes des pentes	Surface (km ²)	Surface (%)	Moyenne
0 - 5	7,19	18,17	2,73
5 - 10	8,60	21,72	7,48
10 - 15	6,86	17,32	12,39
15 - 25	8,57	21,65	19,44
>25	8,37	21,14	40,19
	39,58	100,00	16,97

4.2.3. Sous-bassin versant de l’Oued Bouzerag

D’après le tableau 40 les valeurs du facteur LS du sous-bassin versant de l’Oued Bouzerag varient entre 0 et 225, avec une moyenne de 15,06. La classe des valeurs les plus élevées (>25) occupent une faible surface de 17,08 % observées au centre du sous-bassin principalement dans les zones à fortes pentes (Figure 56), montrent un risque d’érosion élevé de ces régions. Cela signifie que les zones à hautes altitude, où le relief est plus marqué sont particulièrement vulnérables à l’érosion.

En revanche, les valeurs les plus faibles, classe de (0 - 5) occupent la plus grande surface de 23,96 %, se concentrant dans les zones à faible pente, principalement aux plaines où l’érosion est limitée. Ces zones sont donc relativement protégées contre la perte de sol due à l’écoulement faible des eaux le long des surfaces à faible gradient.

Ainsi, les valeurs LS sont élevées dans les zones à forte pente et à haute altitude, ce qui indique que le sol de ces zones est très vulnérable à l’érosion (Figure 56). À l’inverse, les faibles valeurs de LS dans les zones en aval du bassin suggèrent que ces zones sont moins sensibles à l’érosion. Cela correspond aux conclusions de Gelagay et Minale (2016) et Yadeta et al., (2021), qui ont observé l’impact significatif du facteur LS sur la perte de sol dans les zones escarpées du bassin versant.

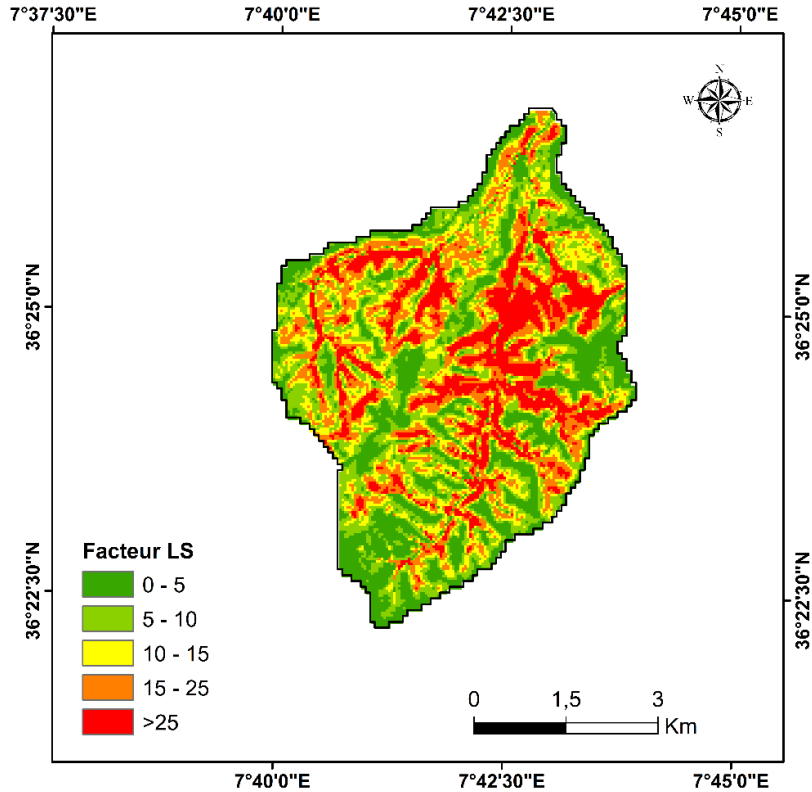


Figure 56. Carte du facteur LS du sous-bassin de l’Oued Bouzerag.

Tableau 40. Répartition des classes des pentes du sous-bassin de l’Oued Bouzerag.

Classes des pentes	Surface (km ²)	Surface (%)	Moyenne
0 - 5	7,13	23,96	2,62
5 - 10	6,79	22,82	7,43
10 - 15	5,13	17,26	12,37
15 - 25	5,62	18,88	19,15
>25	5,08	17,08	40,91

4.3 Estimation du facteur C

4.3.1. Sous-bassin versant de l’Oued Rhirane

La carte du facteur C est créée à l'aide d'une image satellitaire et de l’occupation du sol. La zone d'étude a été divisée en sept classes d'occupation du sol (Figure 57). Chaque classe de C se voit attribuer une valeur, qui va de 0 (zone urbaine) à 1 (sol nu) (Tableau 41).

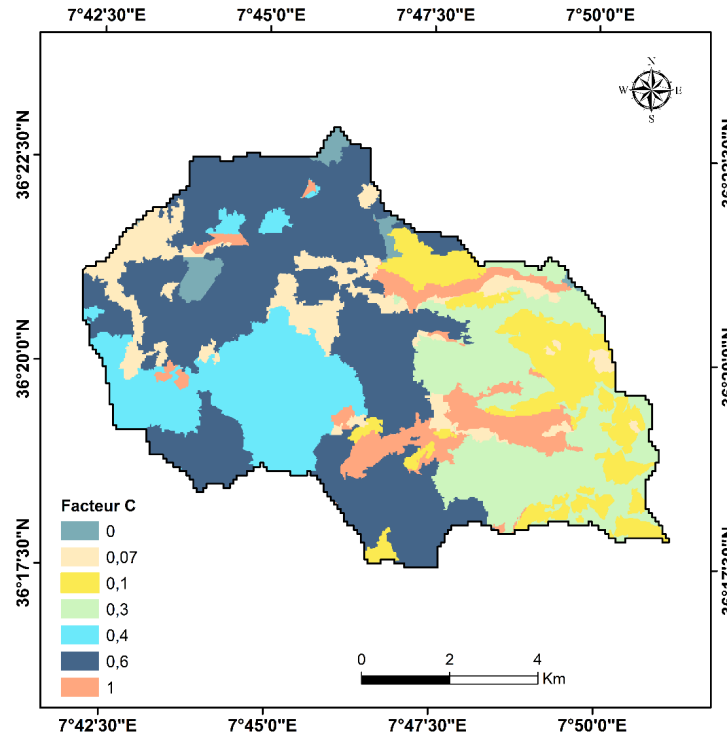


Figure 57. Carte du facteur C du sous-bassin de l’Oued Rhirane.

Tableau 41. Répartition des classes du facteur C du sous-bassin de l’Oued Rhirane.

Facteur C	Occupation du sol	Surface (km ²)	Surface (%)
0	Agglomération	1,45	1,81
0,07	Maquis	7,35	9,15
0,1	Maquis dégradé	8,14	10,14
0,3	Parcours	14,38	17,91
0,4	Parcours dégradés	12,02	14,97
0,6	Cultures	31	38,61
1	Sols nus	5,96	7,42

La zone d’étude est divisée en sept classes d’occupation du sol. Les différents types du couvert végétal se voient attribuer des facteurs de gestion des cultures, allant de 0 (zone urbaine) à 1 (sol nu), avec une valeur moyenne de 0,28. Ainsi, une carte du facteur C est créée. La distribution spatiale du facteur C montre que la zone la plus sensible à l’érosion du sol, avec un facteur C élevé, est située dans les parties Nord, centrale et Sud de la zone d’étude, où il y a moins de couverture végétale permanente, comme les cultures et les sols nus. Selon (Alexakis et al., 2021), les valeurs élevées du facteur C sont liées à une couverture végétale limitée, ce qui peut contribuer à l’érosion du sol. Ces zones couvrent la plus grande surface, avec 38,61 % (Tableau 41) du bassin ayant des valeurs C égales à 0,60, tandis que les sols nus avec C=1 ne couvrent que 7,42 % du terrain.

Les valeurs élevées du facteur C sont généralement le résultat de la variation de la couverture végétale tout au long de l'année, en particulier pendant les saisons des pluies. Par conséquent, la sensibilité à l'érosion du sol varie d'une saison à l'autre.

Le facteur C relativement élevé (valeur de 0,30) caractérise les zones de pâturage qui subissent un ruissellement diffus et une érosion en rigole. Ces zones sont réparties en petites parcelles dans le bassin versant, représentant 17,91 % de la superficie du bassin. Les valeurs faibles et modérées du facteur C caractérisent principalement le maquis (C = 0,07) et le maquis dégradé (C = 0,1), répartis dans les parties Nord et Est du sous-bassin versant, couvrant respectivement 9,15 % et 10,14 % de la superficie du bassin.

4.3.2. Sous-bassin versant de l'Oued Melah

La carte du facteur C (Figure 58) indique que la valeur C varie de 0,07 à 1. Les valeurs de C les plus élevées sont attribuées aux sols nus sans couverture végétale (1) (7,73% de la surface du sous-bassin versant) et aux terres cultivées (0,6) qui couvrent la plus grande surface avec 60,19%, indiquant une plus grande susceptibilité à l'érosion du sol (Tableau 42).

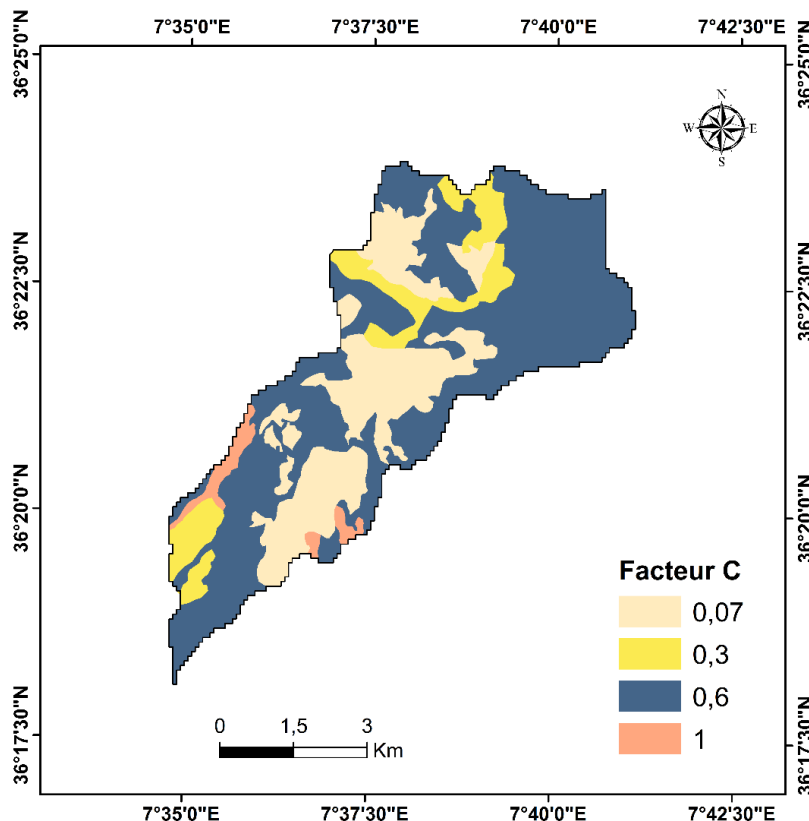


Figure 58. Carte du facteur C du sous-bassin de l'Oued Melah.

Tableau 42. Répartition des classes du facteur C du sous-bassin de l’Oued Melah.

Facteur C	Occupation du sol	Surface (km ²)	Surface (%)
0,07	Maquis	10,41	26,28
0,3	Maquis dégradé et parcours	4,28	10,81
0,6	Cultures	23,84	60,19
1	Sols nus	1,08	2,73

Les valeurs de C les plus faibles ($c = 0,07$, $c = 0,3$) sont trouvées dans les broussailles (maquis) et les broussailles dégradées (maquis dégradé et parcours), qui occupent ensemble 26,28 % et 10,81 % de leurs superficies. Ces zones sont moins vulnérables à l'érosion du sol.

4.3.3. Sous-bassin versant de l’Oued Bouzerag

Les valeurs de C du sous-bassin versant de l’Oued Bouzerag (Figure 59) varient entre 0,07 et 0,6. Les zones présentant les valeurs C les plus élevées (0,6), couvrent 29,83 % de la surface du sous-bassin versant (Tableau 43), et sont principalement situées dans la partie Ouest du sous-bassin versant et quelques-unes dans le Sud.

Inversement, les valeurs C les plus faibles (0,07 et 0,1) sont attribuées aux maquis denses et aux maquis éparses, qui couvrent la plus grande surface du sous-bassin versant avec 32,51 % et 9,33 % respectivement. Ces zones, principalement situées à l'Est, au Sud et au Nord du sous-bassin versant, indiquent une moindre vulnérabilité à l'érosion des sols.

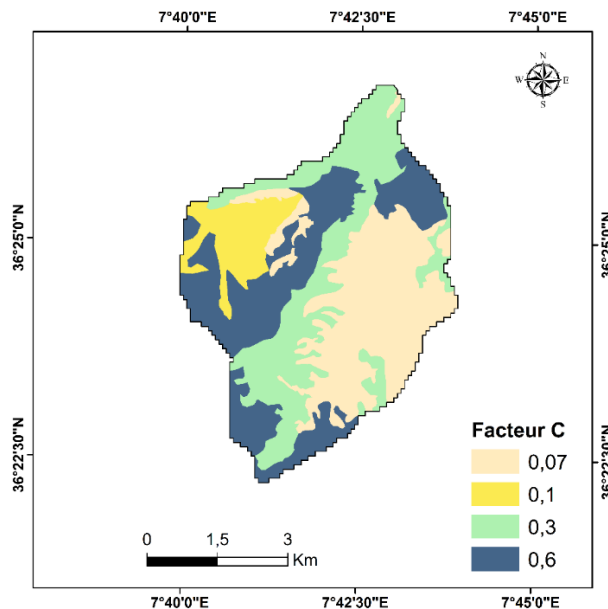


Figure 59. Carte du facteur C du sous-bassin de l’Oued Bouzerag.

Les valeurs modérées (0,3) caractérisent les maquis et les pâturages dégradés, qui couvrent une surface importante de 28,33 % au centre et au Nord du sous-bassin. Cela indique une érosion modérée et une couverture végétale partielle offrant une protection relative contre l'érosion du sol. Bien que la végétation soit présente, elle n'est pas assez dense pour empêcher complètement l'impact direct des gouttes de pluie sur le sol.

Tableau 43. Répartition des classes du facteur C du sous-bassin de l'Oued Bouzerag.

Facteur C	Occupation du sol	Surface (km²)	Surface (%)
0,07	Maquis Dense	9,72	32,51
0,1	Maquis Claire	2,79	9,33
0,3	Maquis dégradé et parcours	8,47	28,33
0,6	Cultures	8,92	29,83

4.4. Evaluation des pertes en sol

Dans cette étude, nous avons évalué tous les facteurs influençant le phénomène érosif, facteurs du modèle RUSLE à savoir l'érosivité des pluies R, l'érodibilité des sols K, le facteur topographique LS, le couvert végétale C. Le croisement de ces facteurs sous forme de données raster dans le logiciel ArcMap 10,4 a permis de produire une carte des pertes en sol couvrant l'ensemble du bassin versant, ce qui nous a permis d'établir la carte des pertes en sol dans les trois bassins de la zone d'étude.

Le taux d'érosion varie d'un bassin versant à l'autre (Tableau 44). Dans notre zone d'étude, l'érosion a atteint des niveaux élevés, dépassant 20 t/ha/an dans les zones à fortes pentes et aux sols nus et fragiles. Ces conditions sont susceptibles de rendre le sol particulièrement vulnérable à l'érosion.

Tableau 44. Résultats statistiques des pertes en sol dans la zone d'étude.

A (t/ha/an)	Rhirane	Melah	Bouzerag
Min	0	0,01	0,01
Max	309,78	192,32	133,13
Moyenne	9,85	11,3	8,06
Ecart type	14,76	15,42	10,15

4.4.1. Sous-bassin versant de l’Oued Rhirane

Selon la carte des pertes en sol du sous-bassin versant de l’Oued Rhirane, le risque d’érosion est principalement concentré dans la partie Sud du sous-bassin, comme le montre la carte de la figure 60. Pour faciliter l'analyse et la compréhension des résultats, nous avons classé les valeurs du risque érosif en 5 classes et les avons présentées dans le tableau 50.

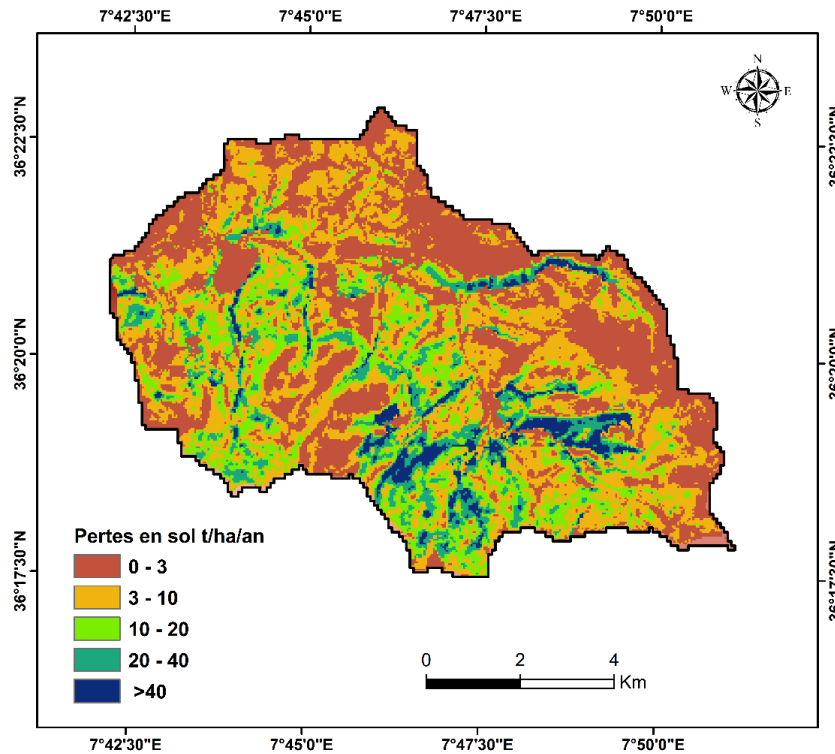


Figure 60. Répartition des pertes en sol du sous-bassin de l’Oued Rhirane.

Tableau 45. Classes et intensité des pertes en sol dans le sous-bassin versant de l’Oued Rhirane.

Classes des pertes en sol (T/ha/an)	Intensité de l’érosion	S (km ²)	S (%)
0 - 3	Très faible	28,16	35,61
3 - 10	Faible	27,88	35,26
10 - 20	Moyenne	12,91	16,33
20 - 40	Forte	6,93	8,76
>40	Très forte	3,19	4,03

La perte moyenne de sol due à l'érosion hydrique dans le sous-bassin versant de l'Oued Rhirane est estimée à 9,85 tonnes par hectare et par an, ce qui dépasse le seuil moyen de tolérance des sols à l'érosion hydrique fixée à 7 tonnes par hectare et par an (Sadiki et al., 2009).

Selon le tableau 45, on a 35,61% de la zone d'étude connaît des taux d'érosion inférieurs à 3 t/ha/an, repartis presque sur toute la surface du sous-bassin où les pentes sont faibles. Cette classe est considérée comme très faible et peu dommageable pour les sols. La classe de 3 à 10 t/ha/an occupe 27,88 km² (35,26%), et elle est considérée comme faible mais peut avoir des effets significatifs sur la qualité du sol à long terme. En outre, il y a 16,33 % de la surface totale qui est soumise à une érosion très importante, comprise entre 10 et 20 tonnes par hectare et par an, qui entraîne une réduction significative de la couche arable et a des conséquences importantes sur les propriétés physico-chimiques du sol. Enfin, les pertes supérieures à 40 t/ha/an, qualifiées très élevées, occupent la plus petite surface de 3,19 km², soit 4,03 % de la surface totale du sous-bassin. Cette zone est principalement située sur des pentes raides et peut entraîner une dégradation irréversible des sols. En résumé, on constate que 29% (>10 T/ha/an) des surfaces possèdent une dégradation à risque des sols.

4.4.2. Sous-bassin versant de l'Oued Melah

Les pertes annuelles de sol du sous-bassin versant de l'Oued Melah varient de 0 à 192,32 t/ha/an (Tableau 46), avec une moyenne annuelle de 11,3 t/ha/an. Le taux de perte en sol annuel moyen estimé pour le bassin versant dépasse aussi le seuil de tolérance de 7 t/ha/an suggéré par Sadiki et al. (2009). Cela suggère que la production agricole et le système de survie dans le bassin versant de l'Oued Melah sont menacés.

Il est important de noter que la valeur la plus élevée ne représente pas la perte globale de sol, mais plutôt la valeur d'un pixel spécifique. Les pixels à valeur élevée se trouvent principalement dans les zones de terres stériles, dans certaines terres agricoles, dans les zones bâties et dans les zones fortement disséquées à forte pente (Figure 61). Cela indique que ces surfaces actuelles sont plus touchées et plus sensibles en termes d'érosion des sols.

Dans le sous-bassin versant de l'Oued Melah, la superficie totale de 36,96 % (11,18 km²) appartient à la catégorie de l'érosion faible, où l'érosion du sol est comprise entre 0 et 3 t/ha/an. Selon le tableau 46, on trouve 36,96 % du bassin qui présente des taux d'érosion du sol compris entre 3 et 10 t/ha/an, ce qui peut être classé comme une vulnérabilité faible. En outre, 10,16% du

bassin présente des pertes en sol comprises entre 20 et 40 t/ha/an, ce qui est considéré comme une vulnérabilité élevée. Enfin, la zone de perte en sol la plus élevée ne représente que 4,16 % du bassin, avec une valeur supérieure à 40 t ha⁻¹ an⁻¹.

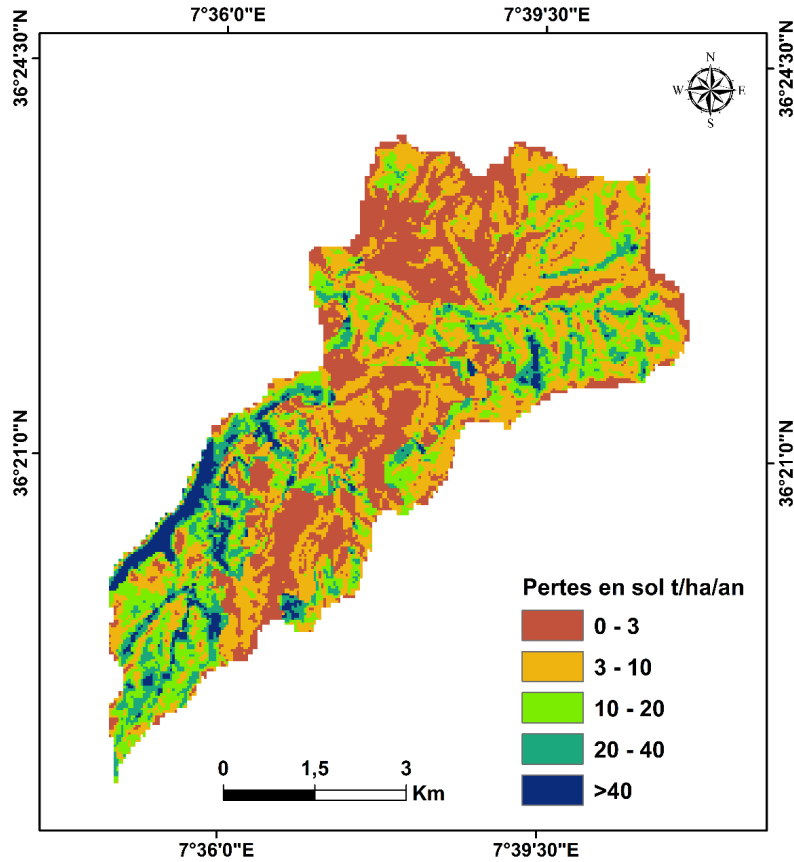


Figure 61. Répartition des pertes en sol du sous-bassin de l’Oued Melah.

Tableau 46. Classes et intensité des pertes en sol dans le sous-bassin de l’Oued Melah.

Classes des pertes en sol (T/ha/an)	Intensité de l'érosion	S (km ²)	S (%)
0 - 3	Très faible	11,18	28,59
3 - 10	Faible	14,45	36,96
10 - 20	Moyenne	7,88	20,14
20 - 40	Forte	3,97	10,16
>40	Très forte	1,63	4,16

4.4.3. Sous-bassin versant de l’Oued Bouzerag

L'analyse de la perte en sol dans le sous-bassin versant de l'Oued Bouzerag indique des variations significatives dans l'érosion et ce en fonction des caractéristiques du terrain et de

l'occupation du sol. Selon le tableau 47, les résultats révèlent que 37,53% (11,02 km²) du bassin est appartenant à la classe 0 - 3, ce qui représente une grande surface dans une zone à faible érosion. Ceci est attribué à la présence d'une végétation protectrice et de pentes modérées, principalement situées dans la partie orientale du sous-bassin, dominé par un maquis clairsemé (Figure 62) à l'Ouest et au Nord où existent les terres cultivées (en zone avale), où les pentes sont minimales. En outre, environ 36,52 % de la surface totale présente une faible érosion (3 à 10 t/ha/an) et est répartie sur la quasi-totalité du sous-bassin versant, ce qui indique une relative stabilité en termes de perte en sol dans la majeure partie du bassin.

Dans certaines zones, l'érosion moyenne est particulièrement préoccupante, où environ 16,27 % du bassin subit des pertes en sol allant de 10 à 20 tonnes par hectare et par an, principalement dans le Nord et le centre du sous-bassin versant, sur des pentes abruptes, et dans des maquis et les pâturages dégradés. Cela indique une vulnérabilité moyenne à l'érosion, mais ces zones risquent de se dégrader davantage en l'absence de mesures de gestion appropriées.

En outre, on a 7,77 % du bassin qui subit des pertes importantes (20 à 40 tonnes par hectare et par an), ce qui met en évidence les zones à haut risque où l'érosion pourrait avoir des impacts environnementaux et économiques négatifs et significatifs, tels que la dégradation des terres agricoles et la sédimentation des cours d'eau.

Enfin, les zones à très forte érosion (plus de 40 tonnes par hectare et par an) ne représentent que 1,91 % du bassin, mais se trouvent souvent sur des pentes raides avec une couverture végétale insuffisante. Ces zones sont exposées à un risque d'érosion rapide, entraînant la perte de sols fertiles et constituent une menace pour l'agriculture et les infrastructures locales.

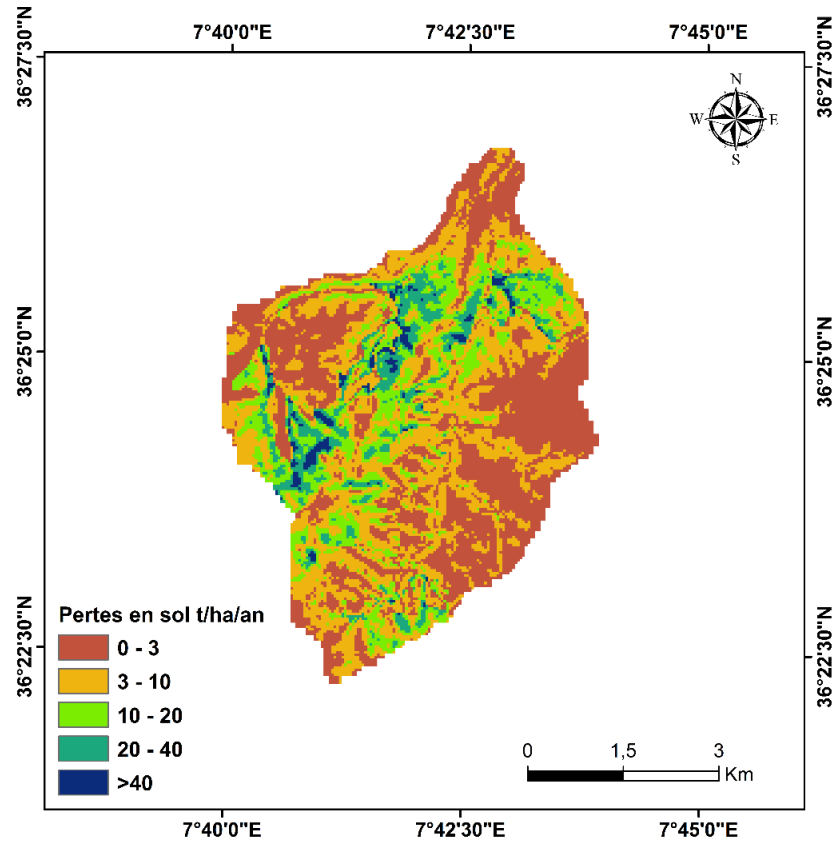


Figure 62. Répartition des pertes en sol du sous-bassin de l’Oued Bouzerag.

Tableau 47. Classes et intensité des pertes en sol dans le sous-bassin versant de l’Oued Bouzerag.

Classes des pertes en sol (T/ha/an)	Intensité de l'érosion	S (km ²)	S (%)
0 – 3	Très faible	11,02	37,53
3 – 10	Faible	10,72	36,52
10 - 20	Moyenne	4,78	16,27
20 - 40	Forte	2,28	7,77
>40	Très forte	0,56	1,91

4.5. Discussion sur l'érodibilité et le modèle RUSLE

Dans le cadre de cette thèse, nous avons étudié l'érosion du sol en utilisant une série de modèles et de méthodologies, y compris le facteur d'érodabilité K, le modèle RUSLE et la création de cartes de sensibilité à l'érosion.

L'examen des trois sous-bassins, à savoir le sous-bassin versant de l'Oued Rhirane, le sous-bassin Melah et le sous-bassin Bouzerag, nous a permis de découvrir des changements significatifs dans les qualités des sols qui déterminent leur sensibilité et de localiser les zones à haut risque d'érosion.

Le sous-bassin versant de l'Oued Bouzerag présente la plus grande moyenne du facteur K $0,06 \text{ t}\cdot\text{ha}\cdot\text{MJ}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$, ce qui montre une grande sensibilité à l'érosion, la zone qui présente le plus grand facteur d'érodibilité occupe une grande surface au milieu du sous-bassin et s'étend du Nord au Sud.

Le modèle RUSLE a également présenté les mêmes zones à risque, les classes d'érosion forte à très fortes qui s'étendent du Nord-Ouest vers le Sud du sous-bassin.

Ces zones sont dominées par les limons, l'érodabilité du sol augmente avec la teneur en limon, et les textures de sol dont le limon est la principale particule sont considérées comme les plus sensibles à l'érosion par l'eau (Bonilla & Johnson, 2012). Cette zone présente également un faible pourcentage d'argile et de matière organique donnant ainsi une faible stabilité des agrégats. Cette tendance est particulièrement visible dans les climats méditerranéens, où une faible teneur en matière organique entraîne une forte érodabilité et la production de croûtes superficielles qui empêchent la pénétration et augmentent le ruissellement (Singer & Bissonais, 1998). De plus, ces zones sont distinguées par des pentes prononcées, des cultures inappropriées et des pâturages clairsemés. Une gestion agricole inappropriée augmente les taux de perte de sol, mais l'agriculture de conservation contribue à réduire les taux de perte de sol (Petito et al., 2022). Cette nature du sol associée aux différentes conditions morphogéniques favorisent le risque d'érosion dans le sous-bassin, en particulier pendant les périodes de fortes précipitations. Enfin, il y a à noter que la valeur de l'érodibilité du sol moyenne est en discordance avec la valeur de l'érosion moyenne annuelle (RUSLE), c'est-à-dire la forte érodibilité ($K = 0,06$) comparée aux deux autres sous-bassins a donné la plus faible valeur d'érosion de 8 T/ha/an.

Le sous-bassin versant de l'Oued Melah présente également une grande sensibilité, avec un facteur K moyen de $0,05 \text{ t}\cdot\text{ha}\cdot\text{MJ}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$. Ce facteur montre que la zone à grande sensibilité localisée dans la partie Sud-Ouest du sous-bassin, est dominée principalement par les sables et les limons. Le taux d'argile est plus important comparé au sous-bassin précédent (avec 20%) ainsi que la matière organique ; néanmoins, ceci n'a pas empêché ce milieu d'être le plus érodé et donner

une vulnérabilité générale des sols à ce phénomène d'érosion. La forte détachabilité du limon fin favorise directement l'érosion par éclaboussures, tandis que sa capacité à créer une croûte superficielle minimise l'érosion par éclaboussures (Saedi et al., 2016).

Le résultat du modèle RUSLE présente le taux d'érosion le plus élevé de 11,30 t/ha/an, le modèle a également donnée la même zone à risque que l'érodibilité des sols, et ce malgré une légère différence ou discordance dans les valeurs enregistrées. Les cartes montrent que la zone du Sud-Ouest présente des pertes en sol forte à très fortes et une faible surface au Nord-Est du sous-bassin considéré. Ces zones sont dominées par des pentes abruptes et des cultures où le labourage inapproprié peut créer des sillons qui favorisent le ruissellement et le transport des particules du sol.

En ce qui concerne l'Oued Rhirane, il présente une érodibilité considérée modérée avec une moyenne 0,03 t ha MJ-1 mm-1. Les zones très sensibles à l'érosion sont principalement situées au centre et dans le Sud du bassin d'étude. Le RUSLE est cohérent avec l'érodibilité du point de vue cartographie ; il présente les mêmes zones à grande sensibilité à l'érosion principalement au centre au Sud et au Sud-Ouest du sous-bassin. Ces zones présentent des pourcentages d'argile et de matière organique les plus élevés comparé aux deux autres sous-bassins, mais ceci était insuffisant pour donner une cohérence plus effective au sol car les taux des limons et des sables fins restent quand même élevés. Ce bassin est dominé par des terres cultivées utilisant des pratiques agricoles inappropriées sur des pentes modérées à forte avec des valeurs d'érosivités moyennes à fortes.

Encore une fois, on constate que le facteur d'érodabilité K, associé aux résultats du modèle RUSLE, a démontré une cohérence significative dans l'identification des zones sujettes à l'érosion. Les analyses ont montré que les endroits présentant des valeurs élevées du facteur K, suggérant une plus grande sensibilité du sol à l'érosion, étaient étroitement liés aux endroits où le modèle RUSLE prévoyait des pertes en sol élevées. Ce lien montre que la nature intrinsèque du sol, telle qu'indiquée par le facteur K, a un impact significatif sur les processus d'érosion observés.

5. Cartographie et répartition des zones sensibles à l'érosion

Nous avons utilisé une méthode qui nous a permis de réaliser un croisement entre les cartes thématiques sous forme de combinaison logique. Chaque combinaison spécifique entre les paramètres est attribuée un degré relatif de sensibilité des sols à l'érosion. Il s'agit donc d'une approche qualitative. Trois niveaux de sensibilité sont retenus : faible, moyen et grande sensibilité.

La superposition des cartes de pente, occupation, lithologie et érodibilité des sols, nous a permis d'identifier les zones les plus affectées par le processus érosif ainsi que les zones à faible sensibilité à l'érosion.

5.1. Zones à grande sensibilité à l'érosion

Les zones à grande sensibilité à l'érosion représentent des surfaces assez importantes pour le sous-bassin versant de l'Oued Rhirane (34,93%), mais elle l'est pour les deux autres sous-bassins avec 45,54% (Oued Melah) et 28,93% (Oued Bouzerag).

Ces zones se distinguent par une dynamique importante qui influence et modifie la topologie de leurs surfaces. Cette dynamique peut être soit rapide et isolée dans le temps et l'espace, soit fréquente et étendue. Ces milieux décrivent des zones d'apport sédimentaire de granulométrie variée. Le caractère dynamique de ces habitats empêche l'établissement d'une couverture végétale. Les sols sont souvent au niveau brut ou peu développés.

D'après le tableau 48, on remarque que le sous-bassin versant de l'Oued Rhirane présente une classe à grande sensibilité qui occupe une surface de 34,93%. Ces zones sont localisées principalement au Nord-Ouest et au Sud du sous-bassin (Figure 63 et Tableau 48), où les sols et roches sont à dominance marneuse et argileuse.

Tableau 48. Classes de sensibilité à l'érosion du sous-bassin de l'Oued Rhirane.

Classes de sensibilité	Surface (km ²)	Surface (%)
Sensibilité faible	12,94	16,53
Sensibilité moyenne	38,00	48,54
Grande sensibilité	27,35	34,93

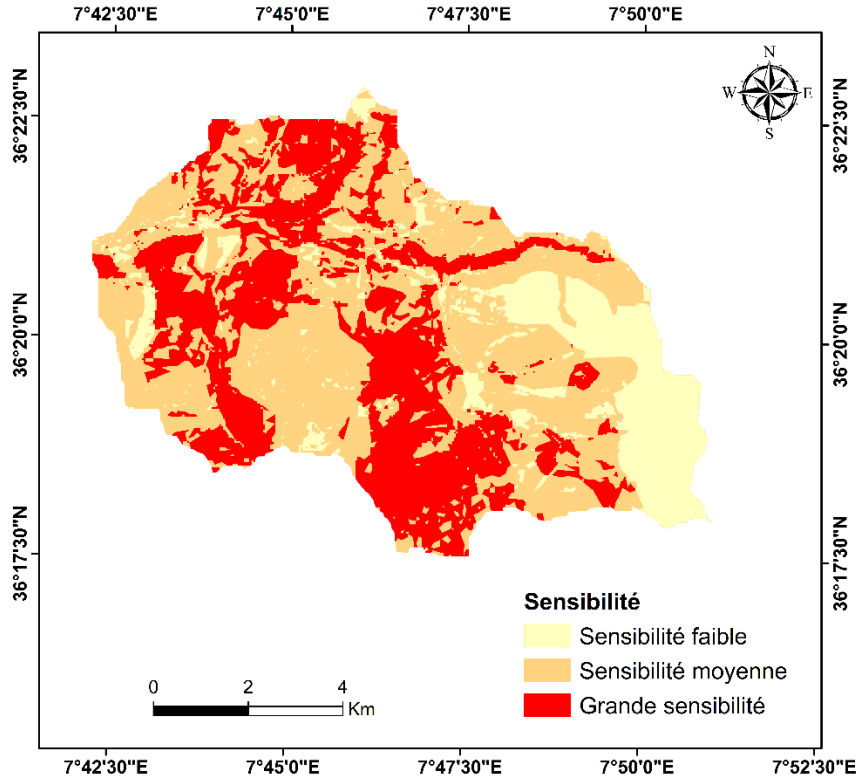


Figure 63. Carte de la sensibilité à l'érosion du sous-bassin de l'Oued Rhirane.

Le sous-bassin versant de l'Oued Melah est très sensible à l'érosion, représentant 45,54 % de la superficie du sous-bassin versant (Tableau 49 et Figure 64). La zone est dominée par des sols nus et des maquis dégradés, de l'argile, des marnes et des calcaires fracturés, avec des pentes supérieures à 15 %.

Tableau 49. Classes de sensibilité à l'érosion du sous-bassin de l'Oued Melah.

Classes de sensibilité	Surface (km ²)	Surface (%)
Sensibilité faible	9,36	24,57
Sensibilité moyenne	11,39	29,89
Grande sensibilité	17,35	45,54

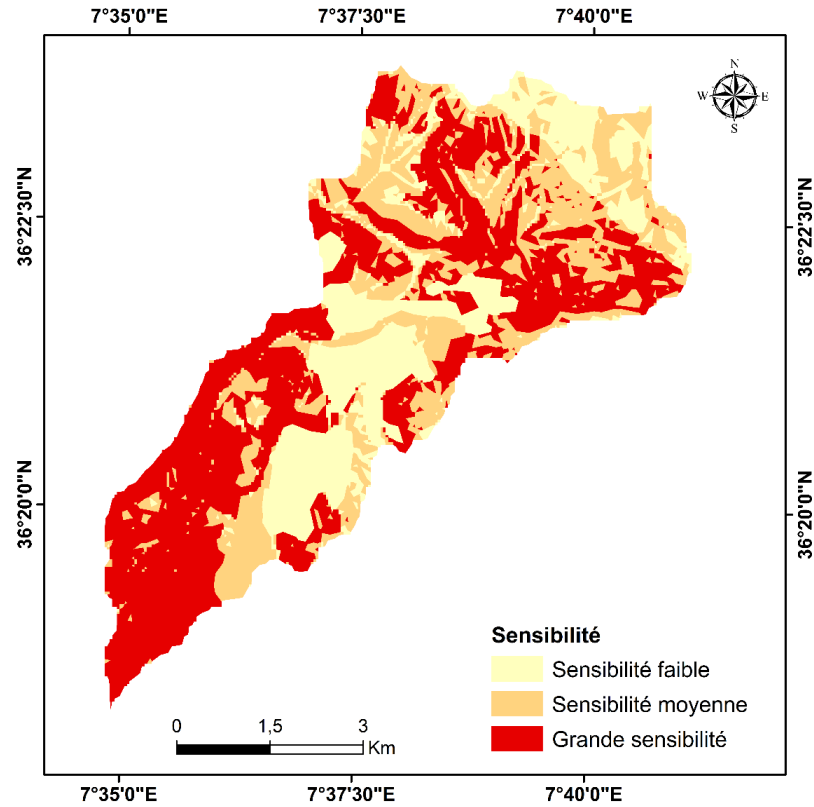


Figure 64. Carte de la sensibilité à l'érosion dans le sous-bassin de l'Oued Melah.

La zone très sensible couvre une grande partie (28,93 %) du sous-bassin versant de l'Oued Bouzerag et s'étend du Nord au Sud. Elle est principalement caractérisée par des cultures, des maquis dégradées et des parcours (Figure 65 et Tableau 50).

Tableau 50. Classes de sensibilité à l'érosion du sous-bassin de l'Oued Bouzerag.

Classes de sensibilité	Surface (km ²)	Surface (%)
Sensibilité faible	2,55	8,61
Sensibilité moyenne	18,50	62,46
Grande sensibilité	8,57	28,93

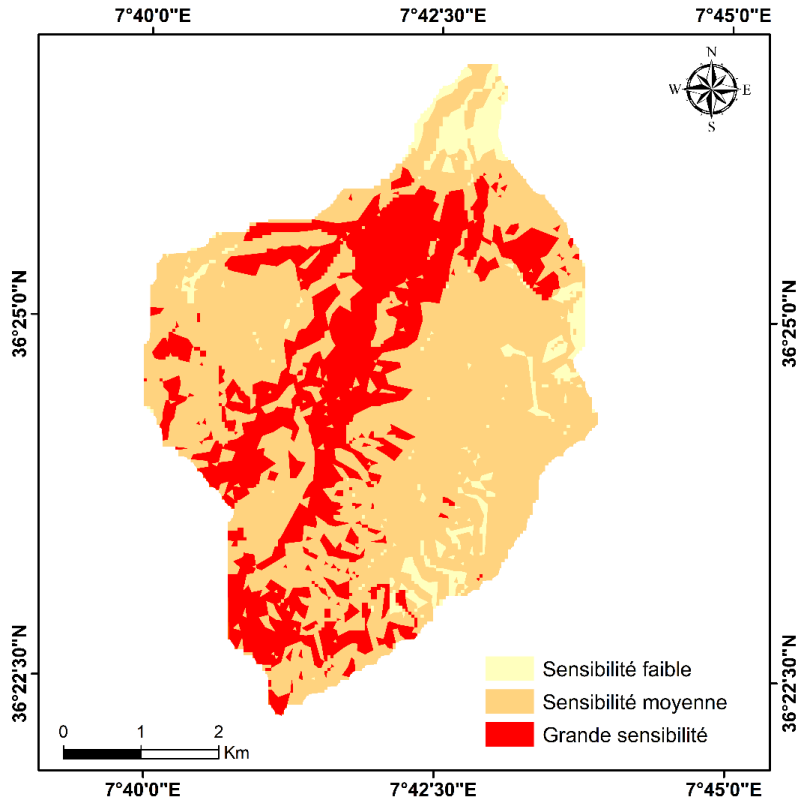


Figure 65. Carte de la sensibilité à l'érosion du sous-bassin de l'Oued Bouzerag.

Les unités lithologiques de ces milieux sont principalement des argiles et des marno-calcaires présents sur des pentes fortes à très fortes, supérieures à 10 %. Il existe également une séquence sablo-argileuse et conglomératique, fragile et friable par endroits, avec des pentes moyennes de 3 à 10 %. Cette constitution lithologique coïncide souvent avec des sols cultivés et parfois avec un domaine forestier clairsemé.

5.2. Zones à sensibilité Moyenne

Cette classe est dominante dans les sous-bassins de l'Oued Bouzerag et l'Oued Rhirane avec 62,46% et 48,54%, tandis que l'Oueds Melah ne représente que presque 30%.

Ces zones de transition entre les milieux à sensibilité réduite et a grande sensibilité, ont des grandes superficies. Ces zones se distinguent par une interférence entre la pédogenèse et la morphogenèse, sans que l'une ou l'autre ne joue un rôle dominant. Les argiles et les calcaires marneux prédominent et abritent principalement des maquis dégradés. Ces milieux ont des pentes allant de 3 à 10 %, certaines dépassant 10 %.

Dans le sous-bassin de l'Oued Rhirane, la classe qui représente une sensibilité moyenne occupe la plus grande surface de 48,54% de la surface totale du sous-bassin. Les zones correspondantes à cette classe sont localisées en petite partie au centre-Est, une partie au Sud, et à l'Ouest du sous-bassin, où la végétation est clairsemée et les pentes sont modérées.

La classe de sensibilité moyenne du sous-bassin de l'Oued Melah couvre une surface de 29,89 %. Cette classe est répartie au Nord et en faible surface dans la partie centrale et centrale Sud du sous-bassin (Figure 64), où sont dominés les cultures, les maquis dégradés et les parcours.

Le présent sous-bassin de l'Oued Bouzerag est modérément sensible à l'érosion, la classe la plus importante couvre une surface significative (62,46 %). Ces surfaces sont réparties sur presque toute la surface du sous-bassin au niveau des maquis à majorité clairsemés où la pente est faible à moyenne (Figure 65 et Tableau 50).

5.3. Zones à sensibilité faible

Cette classe de sensibilité faible est représentée par de très faibles surfaces pour les trois sous-bassins à savoir 16,53% pour l'Oued Rhirane, 24,57% pour l'Oued Melah, et 8,61% pour l'Oued Bouzerag.

La classe à faible sensibilité à l'érosion du sous-bassin de l'Oued Rhirane est localisée principalement à l'Est du sous-bassin sur les lithosols. Dans le sous-bassin de l'Oued Melah, la sensibilité moyenne est située principalement au Nord et au Sud du sous-bassin dominée par des maquis assez denses.

Ces zones se distinguent par des systèmes morphogéniques comportant peu de processus mécaniques et des formes de relief à croissance lente dont la stabilité est assurée par les circonstances topographiques. Ces milieux présentent des paramètres climatiques et morphométriques qui favorisent par endroit la croissance de la végétation. Les maquis mixtes poussent densément sur des pentes modérées à moyennes. Ces milieux se trouvent principalement dans les parties basses des bassins, où les hauteurs sont relativement faibles, ce qui permet aux eaux de ruissellement de s'infiltrer dans le sol.

En analysant la carte de sensibilité et la carte d'érosion (RUSLE) on constate que les zones à forte sensibilité coïncident avec celles mentionnées sur la carte à forte risque d'érosion ; cependant, on observe des discordances au niveau de la zone Nord de l'Oued Rhirane, où on a une zone à grande sensibilité a donné sur la carte d'érosion (RUSLE) une zone à sensibilité moyenne.

Ceci est sûrement dû à la répartition des cultures sur une terre arable où il existe encore une capacité d'eau de lessiver et d'éroder le sol à densité d'occupation assez faible sur un sol fortement limoneux.

6. Estimation de la dégradation spécifique

L'équation du taux de délivrance de sédiment (SDR) détermine le volume réel de sédiments apportés à l'exutoire du sousbassin versant, ce qui donne les résultats présentés dans le tableau 51. L'équation du modèle SDR a été appliquée à la perte annuelle moyenne de sol, ce qui nous a permis de calculer la productivité des sédiments à l'exutoire du bassin versant (production annuelle moyenne de sédiments en suspension). Cela nous permet d'estimer la quantité de sédiments transportée par les oueds.

Tableau 51. Valeurs de la dégradation spécifique de la zone d'étude.

	Oued Rhirane	Oued Melah	Oued Bouzerag
SDR	0,83	0,96	1,01
DS (t/ha/an)	8,20	10,89	8,17
DS (t/an)	26412,66	35055,94	26321,01

Le SDR dans le sous-bassin de l'Oued Rhirane de 0,83 explique que 83 % des sédiments érodés dans le sous-bassin versant passent au sein des cours d'eau et sont transportés vers l'exutoire du cours d'eau principal. Ces sédiments sont issus globalement de l'érosion des versants et du sapement des berges ou glissements. Cela suggère que les cours d'eau ont une plus grande capacité à transporter les matériaux érodés mais une plus faible capacité de dépôt à cause des pentes qui génèrent une accélération de la vitesse de l'eau dans les parties supérieures du bassin.

La dégradation spécifique moyenne des sédiments (DS) de 8,20 t/ha/an représente la quantité de sédiments qui est effectivement transportée par hectare chaque année jusqu'à l'exutoire du bassin. Cette valeur est un indicateur de l'intensité de l'érosion dans le bassin versant. Un taux de 8,20 t/ha/an dépasse généralement les seuils de tolérance pour la stabilité du sol, ce qui suggère que des mesures de conservation du sol peuvent être nécessaires pour réduire le taux de perte de sol.

Le sous-bassin versant de l'Oued Melah présente un taux de délivrance de sédiment (SDR) de 96 % des sédiments produits par l'érosion et qui arrivent à l'exutoire du sous-bassin. Cette valeur

et celle de la dégradation spécifique de presque 11 t/ha/an sont considérées comme élevées qui suggèrent que la majorité des sédiments érodés ne se déposent pas pendant le transport, ils atteignent directement le cours d'eau principal vers l'exutoire. Le SDR élevé est sûrement dû à plusieurs facteurs tels qu'une topographie accidentée et des pentes raides et une couverture végétale assez faible, qui favorisent un écoulement rapide de l'eau et le transport des sédiments (Wu et al., 2020).

Une faible couverture végétale réduit la capacité de rétention du sol, ce qui entraîne une plus grande érosion et un transport accru des sédiments. Ceci a été documenté dans des études de bassins versants dans le Nord de l'Algérie, où les pratiques agricoles et la déforestation sont des facteurs contribuant à l'augmentation de l'érosion (Meddi et al., 2010). L'absence d'obstacles naturels ou artificiels, tels que des bandes herbeuses ou des terrasses, pourrait entraîner un transport ininterrompu de sédiments tout au long du parcours.

Dans le cas de l'Oued Bouzerag, les résultats indiquent un SDR de 1, ce qui signifie que 100 % des sédiments produits sont transportés jusqu'à l'exutoire. Cela pourrait être dû à la présence de sources de sédiments en amont par le ravinement et en aval par les sapements de berge. La valeur de la dégradation spécifique, de 8,17 t/ha/an, est vraiment très proche de celle du sous-bassin de l'Oued Rhirane, donnant une érosion modérée.

Les résultats montrent que le transport solide spécifique (DS) est soumis à plusieurs contraintes physiques des milieux dont on cite les conditions géomorphologiques qui contrôlent la production de la matière en suspension. La variabilité dans le temps et l'espace de quelques agents comme les précipitations entraîne une difficulté dans la compréhension des facteurs influant du transport solide.

Par ailleurs, au niveau des sous-bassins concernés, sommes-nous confiants que les valeurs moyennes de l'érodibilité du sol, les pertes en sol (RUSLE) et la dégradation spécifique diffèrent d'un bassin à un autre car aucune méthode de comparaison n'a été faite pour confirmer ceci surtout que les valeurs sont proches les unes des autres. Pour cela, on a opté pour l'utilisation du test d'hypothèse (Hypothesis testing) avec le test du χ^2 (Chi deux). Ainsi, nous devons introduire une analyse statistique en impliquant les trois bassins avec les trois variables sus-citées mais séparément.

En premier, on établit l'hypothèse H0 (hypothèse nulle) où on mentionne qu'elle désigne qu'il n'y pas de différence entre chaque variable dans les trois bassins étudiés (les valeurs ne différentes pas). Cette hypothèse est acceptée lorsque χ^2 calculé < χ^2 critique (issu de la table de χ^2) et rejetée lorsque lorsque χ^2 calculé > χ^2 critique pour un seuil de signification choisi à 0,05 de probabilité (α). Le nombre de degré de liberté (df = 3 (nombre de bassins) – 1 (nombre de variables utilisées)) = 2

La formule du χ^2 est la suivante :

$$\chi^2 = \sum \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}$$

χ^2 = chi deux calculé ; Oi = valeur observée; Ei = valeur estimée.

Le tableau suivant montre le résultat des calculs des valeurs estimées pour chaque sous-bassin (Tableau 52).

Tableau 52. Résultat des calculs des valeurs estimées.

Sous-bassins	Superficie (km ²)	K _O	K _E	E _O	E _E	DS _O	DS _E
Od Rhirane	80,82	0,03	0,076	9,85	16	8,20	15
Od Melah	39,14	0,05	0,036	11,30	8	11,30	7
Od Bouzerag	29,62	0,06	0,028	8,06	6	8,17	6
		0,14		29,21		27,67	

K= érodibilité du sol ; E= pertes en sol (RUSLE), DS = dégradation spécifique

En cherchant sur la table du χ^2 , avec $\alpha = 5\%$ et df = 2, on obtient χ^2 critique = 5,99.

Ainsi, en appliquant la formule du χ^2 , on obtient les résultats suivants :

χ^2 calculé (pour K) = 0,061 ; χ^2 calculé (pour E) = 4,43 ; χ^2 calculé (pour DS) = 6,50

Etant donné que les valeurs χ^2 calculé pour K et E sont inférieures au χ^2 critique de 5,99, on admet que l'hypothèse H0 peut être acceptée. De ce fait, on constate qu'il n'y a pas de différence entre les valeurs calculées de chacun de l'érodibilité du sol et les pertes en sol avec une confiance de 95% de probabilité. Cependant, la dégradation spécifique varie d'un sous-bassin à un autre car χ^2 calculé > χ^2 critique ; on a une différence significative (rejet de l'hypothèse H0).

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons essayé de comprendre la distribution spatiale de l'érosion hydrique des sols dans trois sous-bassins versants, en calculant les différents paramètres physico-chimiques, morphométrique, et en utilisant différents modèles tels que :

Les analyses physico-chimiques ont mis en évidence de nombreuses variations dans les textures des sols et les concentrations en matière organique ; ces facteurs ont un impact direct sur l'érodabilité des sols. Plus précisément, les régions particulièrement vulnérables à l'érosion se localisent sur des sols qui ont un pourcentage élevé d'argile et de limon (jusqu'à 35 %).

L'étude morphométrique a montré que chaque sous-bassin présentait des caractéristiques uniques. La densité de drainage plus élevée du bassin de l'Oued Rhirane indique un ruissellement plus important, aggravé par l'imperméabilité des roches et l'absence de couverture végétale. La structure géologique plus fracturée, qui rend cette région plus vulnérable à l'érosion, est également illustrée par la fréquence variable des talwegs, en particulier dans le bassin de l'Oued Bouzerag qui selon le degré d'évolution de son relief, ce bassin se caractérise par un stade où le volume montagneux est encore jeune ; donc, il faut s'attendre à une érosion encore plus intense.

La compréhension de l'érodabilité des sols est essentielle pour comprendre les processus d'érosion hydrique, en particulier dans les sous-bassins étudiés - Oued Bouzerag, Oued Melah et Oued Rhirane. Des relations significatives entre la texture du sol et l'érodabilité ont été trouvées dans les analyses, indiquant que les sols riches en limon sont plus sensibles à l'érosion en raison de leur faible cohésion. En revanche, une concentration élevée en sable est liée à une érodabilité réduite, ce qui améliore l'infiltration et réduit le ruissellement. La matière organique, bien qu'elle puisse réduire l'érodabilité, sa corrélation avec l'érodabilité est moins marquée dans certaines régions, comme le bassin de l'Oued Bouzerag.

Les résultats du modèle RUSLE montrent que tous les sites étudiés dépassent le seuil de tolérance des pertes en sol (7 t/ha/an), avec des pertes moyennes qui oscillent entre 8,06 et 11,30 t/ha/an. Grâce à ce modèle nous avons pu localiser les régions présentant un taux d'érosion élevé d'érosion, où ces pertes sont accentuées sur les pentes abruptes à faible couverture végétale.

La carte de sensibilité à l'érosion a été créée en croisant les données de la lithologie, des pentes, de l'utilisation des sols et de l'érodabilité des sols afin d'identifier les zones sujettes à l'érosion dans les sous-bassins. Les régions les plus sensibles sont rencontrées principalement dans

l'Oued Bouzerag et l'Oued Melah. Les zones pénestables ou moyennement sensibles sont prédominantes à l'Oued Rhirane et l'Oued Bouzerag. Ces résultats sont confirmés par une comparaison avec les cartes des pertes en sols (RUSLE), bien qu'il y ait quelques différences, en particulier au nord d'Oued Rhirane.

L'analyse de la dégradation spécifique montre que le transfert des sédiments vers l'exutoire varie considérablement en fonction du taux de délivrance des sédiments (SDR) et des pertes en sol au niveau des versants. Ainsi, on constate que l'Oued Melah a la plus importante dégradation spécifique, ce qui indique un transport intense en raison des contraintes géomorphologiques qui favorisent l'érosion hydrique.

Enfin, le test statistique a fourni plus de clarification en ce qui concerne la comparaison de l'effet érosif dans les trois bassins. Ainsi, les valeurs de perte en sol et d'érodibilité apparaissent homogènes, mais que des variations notables au niveau des transports solides en suspension sont significatives : ce qui suggère que chaque sous-bassin nécessite une approche différente en matière de gestion.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Au terme de cette étude, basée sur les sous-bassins versants de la région de Hammam N'Bails, il nous a été possible de démontrer que la méthodologie employée pour quantifier et identifier les zones à haut risque d'érosion, a permis de dresser un bilan sur l'état des trois sous-bassins de la zone d'étude à savoir, les sous-bassins versants de l'Oued Rhirane, l'Oued Melah et l'Oued Bouzerag. Cette méthodologie a mis en évidence l'importance cruciale d'une approche multidisciplinaire pour identifier et atténuer les risques d'érosion, en intégrant des analyses physico-chimiques, morphométrique, géomorphologique et cartographique.

Dans le cadre de nos travaux, nous avons procédé à un examen approfondi des paramètres suivants :

L'examen des variables influençant l'érosion dans ces sous-bassins montre des relations complexes entre la topographie, la lithologie et la pédologie, la végétation ainsi que le rôle important que joue l'érodibilité du sol dans le processus de l'érosion. La dominance des formations quaternaires, des marnes et marno-calcaires dans le sous-bassin versant de l'Oued Rhirane, sont particulièrement sensible à l'érosion hydrique.

Les méthodes de culture intensives, en particulier pour les cultures céréalières, et les fortes pentes de 15 à 25 % qui dominent, augmentent le ruissellement et aggravent cette susceptibilité. De même, les sols du sous-bassin de l'Oued Melah, constitués d'argiles et de conglomérats, des marnes et de marno-calcaires, peuvent être sensibles à l'érosion hydrique ; et ce malgré le fait que ces sols soient riches en nutriments. Une gestion inappropriée sur des pentes fortes peut compromettre leur structure et accroître leur susceptibilité à l'érosion.

Des conditions similaires sont observées dans le sous-bassin de Bouzerag, des pentes raides et une dominance des formations argilo-gypso-gréseuses et calcaires montrent également une certaine sensibilité marquée à l'érosion. Les Xérosols Orthiques et Calciques de cette région associée à des pratiques agricoles inapproprié expose le sous-bassin à une grande sensibilité à l'érosion.

Les processus d'érosion sont fortement influencés par la fréquence des drains. Par rapport à l'Oued Melah et l'Oued Bouzerag ; l'Oued Rhirane a une plus grande densité de drainage, ce qui

augmente la longueur du ruissellement et exacerbe l'érosion en raison de l'énergie cinétique plus élevée de l'eau de pluie. Cependant, les deux autres oueds bénéficient de la densité du chevelu dont les cours d'eau ravinent plus le milieu. Ces variations montrent comment la densité de drainage et la densité des drains affectent le paysage des milieux vulnérables d'où la nécessité de gérer efficacement l'intensité de creusement et l'érosion en nappe dans chaque région.

Les résultats de l'étude du facteur d'érodibilité des sols (K) sont très utiles pour déterminer comment l'occupation des sols et ces caractéristiques interagissent et influencent le risque d'érosion. L'intégration de propriétés du sol dont l'argile, la matière organique, la concentration en limon était donc indispensable pour quantifier et cartographier le degré de l'érodibilité des sols. Ainsi, l'application de la méthode de Krigeage pour une cartographie spatiale de l'érodibilité des sols a prouvé sa capacité à illustrer l'érosion et à faire progresser notre connaissance de la dynamique érosive des paysages.

Des variations significatives sont observées dont les valeurs d'érodabilité (K) obtenues dans ces sous-bassins sont : 0,03 pour Rhirane, 0,05 pour Melah, et 0,06 pour Bouzerag. D'après ces chiffres, l'Oued Melah doit faire l'objet d'une surveillance plus étroite afin d'empêcher toute perte supplémentaire de sol, tandis que la Rhirane a une résilience modérée à l'érosion. Le bassin de l'Oued Bouzerag est particulièrement vulnérable à l'érosion par l'eau car il a la valeur d'érodabilité la plus élevée.

L'utilisation du modèle RUSLE, a permis une estimation précise de l'érosion hydrique et de reconnaître sa distribution spatiale. Ce modèle prend en compte un certain nombre de variables environnementales, notamment la couverture végétale, l'érodabilité du sol, l'érosivité des précipitations et la pente. Selon les résultats, la perte moyenne de sol dans les trois sous-bassins est supérieure au seuil de tolérance (7t/ha/an). L'Oued Melah a fourni 11,3 t/ha/an, suivi par l'Oued Rhirane (9,85 t/ha/an) et Bouzerag (8,06 t/ha/an). Les taux d'érosion les plus élevés se localisent principalement sur les sols qui présentent des valeurs de l'érodabilité élevées et sur des sols qui comportent des cultures aux pratiques inappropriées sur des pentes raides. Ces résultats soulignent la nécessité d'une gestion adéquate des sols.

Le modèle qualitatif entrepris pour déterminer les zones à risque d'érosion hydrique, à savoir la carte de sensibilité à l'érosion a permis d'établir un zonage des endroits vulnérables et de visualiser les relations complexes entre les différents éléments responsables de l'érosion.

Les résultats montrent que certaines zones sont plus vulnérables à l'érosion en raison de leur topographie élevée et de leur faible couverture végétale. En revanche, les régions où la végétation est plus abondante et les pentes plus douces résistent mieux aux processus d'érosion. Les zones très fortement vulnérables sont rencontrées principalement dans l'Oued Bouzerag et l'Oued Rhirane. Par ailleurs, en incluant les zones moyennement et fortement sensibles à l'aléa de l'érosion hydrique, on constate que l'Oued Bouzerag et l'Oued Rhirane figurent au sommet du classement. Avec ce travail cartographique, les gestionnaires et décideurs peuvent utiliser ce modèle comme base pour trouver des solutions appropriées pour réduire l'impact de l'érosion sur les sols.

Concernant, l'estimation des transports solides spécifiques, le sous-bassin de l'Oued Melah présente le plus grand tonnage, avec 11 t/ha/an. La production des sédiments en suspension dans les deux autres bassins est largement identique. Ces résultats, en utilisant le test statistique de comparaison, sont d'une certaine manière en discordance avec les quantités estimées par les méthodes de quantification de l'érodibilité des sols et des pertes en sol (RUSLE). L'aléa de l'érosion est identique pour ces dernières au niveau des trois bassins mais elle l'est différente lorsqu'il s'agit de comparaison entre les bassins au sujet de la dégradation spécifique. Néanmoins l'ensemble des méthodes utilisées permettent de donner un aperçu global du phénomène de l'érosion qui permettra d'envisager ou d'entreprendre des mesures anti-érosives et de restauration des sols et de l'environnement.

Recommandations et Perspectives

Recommandations et perspectives

Les résultats de cette étude doivent être traduits en recommandation concrètes afin d'améliorer la gestion des ressources en sols et de réduire les effets de l'érosion dans les sous-bassins étudiés. Les possibilités de recherche future doivent également être prises en compte.

Les résultats de notre étude montrent les endroits à risque d'érosion qui nécessitent une attention pour la réhabilitation, la gestion durable des sous-bassins versants et la conservation des sols, ainsi que les endroits qui nécessitent une étude plus approfondie pour améliorer les instruments et les modèles de surveillance de l'érosion.

Sur les terres agricoles en amont des trois sous-bassins versants où l'érosion est importante (dépassé 10 t/ha/an), il est primordial de préserver une couverture végétale permanente et favoriser les cultures des graminées et des légumineuses. Ces plantes protègent le sol en le stabilisant par leurs racines et en réduisant l'impact des précipitations. Les agriculteurs devraient également être encouragés à pratiquer la rotation des cultures et le semis direct, qui peuvent contribuer à réduire l'érosion des sols tout en améliorant la fertilité et en prévenant la perte de sol au fil du temps.

Pour l'Oued Rhirane et l'Oued Melah, la création des terrasses ou utilisation de la biculture en amont sur les sols agricoles, situés sur des pentes supérieures à 15 %, peut réduire la vitesse du ruissellement. Cette méthode d'aménagement peut aider à retenir une quantité d'eau par infiltration sur les replats, limitant ainsi le transport de sédiments vers l'aval des versants.

Etant donné que le labourage dans le sens de la pente est un phénomène visible dans les sous-bassins étudiés, il serait pratique de faire des formations aux agriculteurs sur les techniques de conservation du sol, tels que le labourage selon les courbes de niveau, le paillage, ou le non labour et l'utilisation des engrais organiques. Ces pratiques contribuent à ralentir le ruissellement et à favoriser l'infiltration de l'eau. Cette technique de labour peut être combinée avec des bandes enherbées pour une protection supplémentaire.

Dans les sols nus des sous-bassins de l'Oued Rhirane et l'Oued Melah, l'érosion est très importante, il est nécessaire de faire un reboisement des maquis pour stabiliser et maintenir le sol contre son détachement et lessivage.

Dans la partie Sud, Sud-Est du sous-bassin versant de l'Oued Rhirane, d'après les gardes forestiers de la région, les éleveurs contribuent à la dégradation du maquis en vue d'extension des parcours (par les incendies). Ces pratiques favorisent le ruissellement et le transport des sédiments lorsque les sols sont dégradés de la couverture végétale ; pour cela on propose un reboisement de maquis et de forêts. Pour les sols agricoles en aval où l'érosion est élevée (cas de l'Oued Rhirane et l'Oued Melah), les bassins de rétention et les fossés de drainage peuvent aider à retenir les matériaux provenant des zones en amont, ce qui profite aux sols agricoles en aval.

Au niveau du réseau hydrographique en amont et même en aval il est primordial de faire des corrections torrentielles, par la création des gabionnages, ce qui va ralentir l'écoulement des eaux courantes et réduire les sapements des berges des cours d'eau. Également, des plantes fixatrices de sol (plantes indigènes) peuvent être plantées le long des berges à risque d'érosion pour réduire le détachement et le transport des sédiments et /ou apparition des glissements de terrain qui sont une importante source de transport des sédiments en suspension dans les oueds.

Pour les zones de parcours, on remarque une érosion moyenne entre 3 et 10 t/ha/an (cas de l'Oued Rhirane et l'Oued Bouzerag), une gestion de la charge du pâturage est nécessaire pour éviter le compactage excessif du sol, ce qui aide le sol à se reconstituer et à prévenir la surexploitation. La plantation de barrières végétales constitue une protection naturelle contre l'érosion.

Enfin, dans les zones sensibles à l'érosion, principalement agricoles, les haies ou les petites parcelles de bois constituent des protections supplémentaires. La plantation des espèces végétales résistantes au piétinement est également essentielle pour stabiliser le sol et réduire le risque d'écoulement d'eau en surface.

Pour une étude plus poussée, dans le but de lutter efficacement contre le phénomène érosif qui menace les sous-bassins versants étudiés, et dont les répercussions deviennent de plus en plus évidentes, les recherches futures devraient prendre en compte les perspectives suivantes :

- La modélisation de l'érosion hydrique en utilisant des modèles plus performants tels que le SWAT (Soil and Water Assessment Tools) et le WEPP (Water Erosion Prediction Project). Ces modèles avancés permettront une évaluation plus précise du phénomène de l'érosion hydrique en incorporant des variables telles que les paramètres hydroclimatiques, l'occupation des sols et les activités agricoles, la nature géologique du terrain. Grâce à cette base de données et au logiciel, il est possible de simuler divers scénarios de gestion et de prédire les impacts probables de l'érosion

des sols, ce qui permettra de prendre des décisions plus éclairées en matière de conservation des ressources naturelles.

L'utilisation de techniques de l'intelligence artificielle telles que les réseaux de neurones et 'Machine Learning', qui sont des méthodes performantes pour quantifier l'érosion hydrique, est devenue crucial pour mener à bien toute étude de recherche. Ces méthodes stochastiques de recherche permettent d'étudier des ensembles de données massives et complexes, qui traduisent des réflexions sur l'identification une meilleure connaissance de la dynamique de l'érosion des sols en vue d'améliorer la précision des prévisions et identifier les principaux contraintes et potentialités des facteurs et processus de l'érosion.

Références

Références

- Addis, H. K., & Klik, A.** (2015). Predicting the spatial distribution of soil erodibility factor using USLE nomograph in an agricultural watershed, Ethiopia. *International Soil and Water Conservation Research*, 3, 282–290.
- Ahamefule, H., Fatola, F., Olaniyan, J., Amana, M., Eifediyi, E., Ihem, E., Nwokocha, C., Adepoju, A., Adepoju, I., Babalola, M.** (2018). Prediction Models for Water Erosion Risk Management: A Review. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 22, 1389.
- Aksoy, H., Kavvas, M.L.** (2005). A review of hillslope and watershed scale erosion and sediment transport models. *Catena* 64, 247–271.
- Alewell, C., Borrelli, P., Meusburger, K., Panagos, P.** (2019). Using the USLE: Chances, challenges and limitations of soil erosion Modelling, *International Soil and Water Conservation Research* 7(3): 203–225.
- Alexakis, D., Manoudakis, S., Agapiou, A., Polykretis, C.** (2021). Towards the Assessment of Soil-Erosion-Related C-Factor on European Scale Using Google Earth Engine and Sentinel-2 Images, *Remote Sensing*, 13, 5019, <https://doi.org/10.3390/rs13245019>.
- Aranda, V., Oyonarte, C.** (2005). Effect of vegetation with different evolution degree on soil organic matter in a semi-arid environment (Cabo de Gata-Níjar Natural Park, SE Spain), *Journal of Arid Environments*, 62, 631–647, <https://doi.org/10.1016/J.JARIDENV.2005.01.019>.
- Arnoldus, H.M.J.** (1980). An approximation of the rainfall factor in the Universal Soil Loss Equation. In: De Boodt, M., Gabriels, D. (Eds.), *Assessment of Erosion*. Wiley, Chichester, UK, pp. 127–132.
- Beck, M.B.** (1987). Water quality modeling: a review of uncertainty. *Water Resources Research* 23(8) :1393-1442.
- Beczek, M., Ryzak, M., Mazur, R., Sochan, A., Polakowski, C., Bieganowski, A.** (2022). Influence of slope incline on the ejection of two-phase soil splashed material. *PLoS ONE*, 17. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0262203>.

- Benali, A., & al.** (2015). "Impact de l'érosion des sols sur la productivité agricole dans la région de l'Ouarsenis." *Journal of Arid Land Studies*.
- Benslama, A., Khanchoul, K., Benbrahim, F, Boubehziz, S, Chikhi, F, Navarro-Pedreno, J.** (2020). Monitoring the Variations of Soil Salinity in a Palm Grove in Southern Algeria, *Sustainability*, 12, 6117.
- Bhunja, G.S., Shit, P.K., Chattopadhyay, R.** (2018). Assessment of spatial variability of soil properties using geostatistical approach of lateritic soil (West Bengal. India). *Annals of Agrarian Science*, 16, 436-443.
- Blanco, H. et Lal, R.** (2010). Principles of Soil Conservation and Management. *Springer*. New-York, État de New-York, États-Unis d'Amérique. 617 pages.
- Bonilla, C.A., Johnson, O.I.** (2012). Soil erodibility mapping and its correlation with soil properties in Central Chile, *Geoderma*, 189, 116-123, <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA,2012,05,005>.
- Borrelli, P., Robinson, D.A., Fleischer, L.R.** (2017). An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nature Communication* 8, (2017). <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7>
- Boudjemaa, M., & al.** (2010). "L'érosion et la gestion des sols dans la vallée de la Soummam." *Revue des Sciences de l'Eau*. 23(3).
- Cambardella, C.A., Moorman, T.B., Novak, J.M., Parkin, T.B., Karlen, D.L., Turco, R.F., Konopka, A.E.** (1994). Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils. *Soil Science Society of American Journal*, 58, 1501–1511.
- Cao, X., Hu, X., Han, M., Jin, T., Yang, X., Yang, Y., He, K., Wang, Y., Huang, J., Xi, C., et al.** (2022). Characteristics and predictive models of hillslope erosion in burned areas in Xichang, China, on March 30, *Catena*, 217, 106509.
- Carlos, A.B., Odette. I.J.** (2012). Soil erodibility mapping and its correlation with soil properties in Central Chile, *Geoderma*, 189–190, 116–123.

Chaplot, V., and Bissonnais Y. L. (2000). Field measurements of interrill erosion under different slopes and plot sizes, *Earth Surface Processes and Landforms*, 25 (2), 145–153. DOI [10.1002/\(SICI\)1096-9837\(200002\)25:2<145::AID-ESP51>3.0.CO;2-3](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(200002)25:2<145::AID-ESP51>3.0.CO;2-3)

Chebbani R., Djilli K., Roose Eric. (1999). Etude à différentes échelles des risques d'érosion dans le bassin versant de l'Isser. In : L'influence de l'homme sur l'érosion : 1. A l'échelle du versant. *Bulletin - Réseau Erosion*, (19), p. 85-95 multigr. L'Homme et l'Erosion : Colloque International, Yaoundé (CMR), 1999/12/09-19.

Dahmani A., (2012). Contribution à l'étude de l'érosion et du ruissèlement des sols rouges dans les monts de Tlemcen ; utilisation de simulation de pluies. Mémoire de magistère en foresterie, Université Abou Baker Belkain-Tlemcen, 130p.3.

Demmak, A. (1982). *Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale* (Thèse de doctorat en ingénierie). Université de Paris, France. 323 pages.

Deore, S.J. (2005). Prioritization of Micro-watersheds of Upper Bhama Basin on the Basis of Soil Erosion Risk Using Remote Sensing and GIS Technology. PhD thesis, University of Pune, Pune.

Deschênes, J., Bouchard, J., Gagnon, P. (2007). "Calibration of Sediment Delivery Models in Forested Watersheds." *Canadian Journal of Forest Research*, 37(5), 1001-1010.

Devi, G. K., Ganasri, B. P., Dwarakish, G. S. (2015). A Review on Hydrological Models. *Aquatic Procedia*, 4, 1001-1007. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.126>.

ELD Initiative. (2015). The value of land: prosperous lands and positive rewards through sustainable land management. Available from www.eld-initiative.org.

FAO. (2009). *The State of Food and Agriculture 2009: Livestock in the Balance*. Rome, FAO. ISBN 978-92-5-106215-9.

FAO. (2017). *Voluntary guidelines for sustainable soil management* Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome, Italy.

FAO. (1976). La conservation des sols dans les pays en voie de développement. *Bulletin pédologique*, vol. 30, 92p.

Fortuin, R. (2006). Soil Erosion in Cameron Highlands, an Erosion Rate Study of a Highland Area. Saxion University Deventer.

Ganasri, B.P. Ramesh, H. (2016). Assessment of soil erosion by RUSLE model using remote sensing and GIS - A case study of Nethravathi Basin, *Geoscience Frontiers* 7(6), 953–961.

Gelagay, H. S. and Minale, A. S. (2016). Soil loss estimation using GIS and Remote sensing techniques: A case of Koga watershed, Northwestern Ethiopia, *International Soil and Water Conservation Research*, 4(2): 126-136.

Ghosal, K. and Das, B. S. (2020). A Review of RUSLE Model. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 48: 689-707.

Ghosal, K.; Bhattacharya, S.D. (2021). Identification of the relationship between temporally varying land surface temperature of winter season with the cover management factor of revised universal soil loss equation: A case study from upper Bakreshwar river basin. 6.; In *Geoinformatics in eSearch & Development*; Banerjee, T., Ed.; South Asian Institute for Advanced Research and Development (SAIARD): Kolkata, India, pp.60–71.

Gia, T. P., Degener, J., and Kappas, M. (2018). Integrated universal soil loss equation (USLE) and Geographical Information System (GIS) for soil erosion estimation in A Sap basin: Central Vietnam. *International Soil and Water Conservation Research*, 6(2) : 99-110.

Greco J., 1966. L'érosion la Défense et la Restauration des Sols, le Reboisement en Algérie. Publication du ministère de l'agriculture et de la réforme agraire, Alger. 393p.

Guo, M, Chen, Z., Wang, W., Wang, T., Wang, W., Cui, Z. (2021). Revegetation induced change in soil erodibility as influenced by slope situation on the Loess Plateau, *The Science of the total environment*, 772, 145540, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145540>.

Guzman, G., Laguna, A., Canasveras, J.C., Boulal, H., Barron, V., Gomez-Macpherson, H., Giraldez, J.V., Gomez, J.A. (2015). Study of sediment movement in an irrigated maize-cotton system combining rainfall simulations, sediment tracers and soil erosion models. *Journal of Hydrology* 524, 227–242.

- Hao, H., Wang, J., Guo, Z., & Hua, L.** (2019). Water erosion processes and dynamic changes of sediment size distribution under the combined effects of rainfall and overland flow. *CATENA*, 173, 494-504. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2018.10.029>.
- Haregeweyn, N., Tsunekawa, A., Poesen, J., Tsubo, M., Meshesha, D.T., Fenta, A.A., Nyssen, J., Adgo, E.** (2017). Comprehensive assessment of soil erosion risk for better land use planning in river basins: case study of Upper Blue Nile River. *Science of the Total Environment*, 574 :95–108. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.019>.
- Hutchinson, C.** (2006). L'homme, principal acteur de la désertification. *Futura-sciences*. Unesco.
- Igwe, P.U., Onuigbo, A.A., Chinedu, O.C., Ezeaku, I.I., Muoneke, M.M.** (2017). Soil Erosion: A Review of Models and Applications. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science (IJAERS)*, 4, 237341.
- Jensen, J., Schjøning, P., Watts, C., Christensen, B., Peltre, C., Munkholm, L.** (2019). Relating soil C and organic matter fractions to soil structural stability, *Geoderma*, <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2018.10.034>.
- Karydas, C.G., Panagos, P., Gitas, I.Z.** (2014). A classification of water erosion models according to their geospatial characteristics. *International Journal of Digital Earth*, 7, 229–250.
- Kavianpoor, H., Esmali Ouri, A., Jafarian Jeloudar, Z., Kavian, A.** (2012). Spatial variability of some chemical and physical soil properties in Nesho Mountainous Rangelands. *American Journal of Environmental Engineering*, 2(1), 34-44.
- Khanchoul K., Boubehziz S.** (2019). Spatial variability of soil erodibility at El Hamman Catchment, northeast of Algeria. *Environment and Ecosystem Science*, 3(1): 17-25.
- Khademalrasoul, A., Amerikhah, H.** (2020). Assessment of soil erosion patterns using RUSLE model and GIS tools (case study: the border of Khuzestan and Chaharmahal Province, Iran). *Modeling Earth Systems and Environment*, 7, 885 - 895. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00931-6>.

- Kokkonen, T., Koivusalo, H., Karvonen, T.** (2001). A semi-distributed approach to rainfall runoff modelling—a case study in a snow affected catchment. *Environmental Modelling & Software*, 16(5), 481-493. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S1364-8152\(01\)00028-7](http://dx.doi.org/10.1016/S1364-8152(01)00028-7).
- Lakhankar, T., Jones, A.S., Combs, C.L., Sengupta, M., Vonder Haar, T.H., Khanbilvardi, R.** (2010). Analysis of large-scale spatial variability of soil moisture using a geostatistical method. *Sensors*, 10(1), 913-932.
- Li, X., Gao, J., Guo, Z., Yin, Y., Zhang, X., Sun, P., Gao, Z.** (2020). A Study of Rainfall-Runoff Movement Process on High and Steep Slopes Affected by Double Turbulence Sources, *Scientific Reports*, 10, <https://doi.org/10.1038/s41598-020-66060-3>.
- Liu, M., Han, G., Li, X., Zhang, S., Zhou, W., Zhang, Q.** (2020). Effects of soil properties on K factor in the granite and limestone regions of China, *International Journal of Environmental Research and Public Health* ;17(3):801. <https://doi.org/10.3390/ijerph17030801>
- Lu, H., Moran, C. J., and Prosser, I. P.** (2006). Modelling sediment delivery ratio over the murray darling basin. *Environmental Modelling & Software*. 21, 1297–1308. **DOI: 10.1016/j.envsoft.2005.04.021**
- Mateus, A. and Salumbo, D. O.** (2020). A Review of Soil Erosion Estimation Methods. *Agricultural Sciences*, 11(8): 667-691.
- Maner, S.B.** (1958). Factors affecting sediment delivery rates in the Red Hills physiographic area. *Transactions of the American Geophysical Union* 39(4):669–675
- Meddi, H, Bouzidi, A, Derradji, F.** (2010). Estimation de la production de sédiments et du transport solide dans les bassins versants du nord de l'Algérie, *Revue des Sciences de l'Eau*, 23(1), 49-60.
- Merritt, W. S., Letcher, R. A., and Jakeman, A. J.** (2003). A review of erosion and sediment transport models, *Environmental Modelling & Software.*, 18, 761–799, [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(03\)00078-1](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(03)00078-1).
- Mohammed, S., Alsafadi, K., Talukdar, S., Kiwan, S., Hennawi, S., Alshihabi, O., Sharaf, M., and Harsanyie, E.** (2020). Estimation of soil erosion risk in southern part of Syria by using

RUSLE integrating geo informatics approach. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 20: 100375.

Moore, I.D., Burch, G.J. (1986). Physical basis of the length-slope factor in the Universal Soil Loss Equation (USLE). *Soil Science Society of America Journal*, 50, 1294-1298, which delves into the application of the USLE to predict soil erosion based on terrain slope and length.

Morgan, R.P.C. (2005). *Soil erosion and conservation*, 3rd edition Oxford: Blackwell publishing

Mostephaoui T., Merdas S., Sakaa B., Hanafi M.T., Benazzouz M.T. (2013). Cartographie des risques d'érosion hydrique par l'application de l'équation universelle de pertes en sol à l'aide d'un système d'information géographique dans le bassin-versant d'el Hamel (Boussaâda) Algérie [Mapping of water Erosion risk by the application of Universal Soil Loss Equation using the geographic information systems in the El Hamel watershed (Boussaâda) Algeria]. *Journal Algérien des Régions Arides*. N° spécial. Vol. 201 p. 131–146.

Moyerson, S. (1989). *Étude et prévision de l'érosion des sols limoneux cultivés en moyenne Belgique* (Thèse de doctorat en sciences géographiques, Université de Liège). Liège : Ulg, 356 pages et annexes.

Pande, L.M., Prasad, J., Saha, S.K. and Subramanyam, C. (1992). Review of Remote Sensing applications to soils and agriculture. *Proceedings of the Silver Jubilee Seminar*, Indian Institute of Remote Sensing (IIRS), Dehra Dun.

Park, S.J., Vlek, P.L.G. (2022). Environmental correlation of three-dimensional soil spatial variability: A comparison of three adaptive techniques. *Geoderma*, 109, 117–140.

Pechlivanidis, I. G., Jackson, B. M., McIntyre, N. R., & Wheeler, H. S. (2011). Catchment Scale Hydrological Modelling: A Review of Model Types, Calibration Approaches and Uncertainty Analysis Methods in the Context of Recent Developments in Technology and Applications. *Global NEST Journal*, 13(3), 193-214.

Petito, M., Cantalamessa, S., Pagnani, G., Degiorgio, F., Parisse, B., Pisante, M. (2022). Impact of Conservation Agriculture on Soil Erosion in the Annual Cropland of the Apulia Region (Southern Italy) Based on the RUSLE-GIS-GEE Framework, *Agronomy*, <https://doi.org/10.3390/agronomy12020281>.

- Petlušová, V., Petluš, P., Sevcik, M., Hreško, J.** (2021). The Importance of Environmental Factors for the Development of Water Erosion of Soil in Agricultural Land: The Southern Part of Hronská Pahorkatina Hill Land, Slovakia, *Agronomy*, <https://doi.org/10.3390/agronomy11061234>.
- Poesen, J. W., Nachtergaele, J., Verstraeten, G., Valentin, C.** (2003). Gully Erosion and Environmental Change: Importance and Research Needs. *Catena*, 50, 91– 133. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(02\)00143-1](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(02)00143-1).
- Remini, B.** (2000). L’envasement des barrages. Quelques exemples Algériens [The silting of dams. Some Algerian examples]. *Bulletin du Réseau Erosion*. No 20 p. 165–171.
- Remini, B. et Hallouche, W.** (2007). Studying Sediment. *Revue International Water Poweret Dam construction*. October, 42-45.
- Renard, K. and Freimund, J. R.** (1994). Using monthly precipitation data to estimate R-factor in the revised USLE, *Journal of Hydrology*, 157, 287–306,1994.
- Renard. G., Foster G.R., Weesies G.A., Mccool D.K., Yoder D.C.** (1997). Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). *Agricultural Handbook 703*, U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Washington D.C., 404 p.
- Roose, E.** (1994). Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). Rome : FAO, 438 p. (*Bulletin Pédologique de la FAO ; 70*). ISBN 92-5-203451-X.
- Roose, E., Arabi M., Brahamia K., Chebbani R., Mazour M., Morsli B.** (1993). Erosion en nappe et ruissellement en montagne méditerranéenne algérienne. Réduction des risques érosifs et intensification sur la production agricole par la GCES: synthèse des campagnes 1984– 1995 sur un réseau de 50 parcelles d’érosion. *Cahiers ORSTOM, Série Pédologie*, 28(2), 289–308.
- Saavedra, C.** (2005). Estimating spatial patterns of soil erosion and deposition in the Andean region using geo-information techniques: a case study in Cochabamba, Bolivia Ph.D. dissertation, Wageningen University, The Netherlands.
- Sadiki, A., Faleh, A., Zezere J.L., Mastass, H.** (2009). Quantification de l’érosion en nappes dans le bassin versant de l’Oued Sahla Rif central Maroc, *Cahiers Géographiques*, Vol, 6, p, 59-70.

- Saedi, T. Shorafa, M., Gorji, M., & Moghadam, B.** (2016). Indirect and direct effects of soil properties on soil splash erosion rate in calcareous soils of the central Zagross, Iran: A laboratory study, *Geoderma*, 271, 1-9, <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA,2016,02,008>.
- Saha, S.K., Kudrat, M. and Bhan, S.K.** (1991). Erosional soil loss prediction using digital satellite data and USLE. 369-372.
- Santos, F.L., Reis, J.L. Martins, O.C., Castanheira, N.L., Serralheiro, R.P.** (2003). Comparative assessment of infiltration, runoff and érosion of sprinkler irrigated soils. *Biosystem Engineering* 86(3): 355-364.
- Seidel, E. J., & Oliveira, M. S.** (2016). A classification for a geostatistical index of spatial dependence. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 40, e0160007. <https://doi.org/10.1590/18069657rbcS20160007>
- Singer, M, Bissonnais, Y.** (1998). Importance of surface sealing in the erosion of some soils from a mediterranean climate, *Geomorphology*, 24, 79-85, [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(97\)00102-5](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(97)00102-5).
- Soinne, H., Keskinen, R., Tähtikarhu, M., Kuva, J., Hyväluoma, J.** (2023). Effects of organic carbon and clay contents on structure-related properties of arable soils with high clay content, *European Journal of Soil Science*, 74, <https://doi.org/10.1111/ejss,13424>.
- Strahler, A.** (1952). Dynamic Basis of Geomorphology. *Geological Society of America Bulletin*, 63, 923-938. [http://dx.doi.org/10.1130/0016-7606\(1952\)63\[923:DBOG\]2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1130/0016-7606(1952)63[923:DBOG]2.0.CO;2)
- Tao, M., and Chen, X.** (2015). Afforestation influence on soil moisture dynamics and runoff on the Loess Plateau. *Yellow River* 37 (3), 96–99. (in Chinese with English Abstract).
- Temple, P. et Rapp, A.** (1972). Landslides in the MGETA area, Western Uluguru mountains Tanzania. In: *Studies of Soil erosion and Sedimentation in Tanzania*. Rapp, Berry et Temple (eds.), *Geografiska Annales*, 54(3): 157-194.
- Terfous, A., Megnounif, A. & Bouanani, A.** (2001). Etude du transport solide en suspension dans l'Oued Mouilah (Nord-Ouest Algérien). *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 14(2), 173–185. <https://doi.org/10.7202/705416ar>

Tian, P., Xu, X., Pan, C., Hsu, K., & Yang, T. (2017). Impacts of rainfall and inflow on rill formation and erosion processes on steep hillslopes, *Journal of Hydrology*, 548, 24-39, <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2017.02.051>.

Tsitsagi, M., Berdzenishvili, A., & Gugeshashvili, M. (2018). Spatial and temporal variations of rainfall-runoff erosivity (R) factor in Kakheti, Georgia. *Annals of Agrarian Science*, 16(3), 226–235. <https://doi.org/10.1016/j.aasci.2018.06.003>

Vaze, J., Jordan, P., Beecham, R., Frost, A., Summerell, G. (2012). Guidelines for Rainfall Runoff Modelling: Towards best practice model application (pp. 47).

Wackernagel, H. (1995). *Multivariate Geostatistics. An Introduction with Applications*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany.

Walling, D.E., Collins, A.L., Leeks, G.J.L. (1999). "The Impact of Land Use and Land Management on Erosion and Sediment Yield in Agricultural Catchments." *Earth Surface Processes and Landforms*, 24(6), 507-522.

Wang, Y., Cheng, C., Xie, Y., Liu, B., Yin, S., Liu, Y., & Hao, Y. (2017). Increasing trends in rainfall-runoff erosivity in the Source Region of the Three Rivers, 1961-2012, *The Science of the total environment*, 592, 639-648, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.02.235>.

Wang, F., Chen, J., & Lin, L. (2018). Effects of Rainfall-Induced Topsoil Structure Changes on Root-Zone Moisture Regime during the Dry Period. *Eurasian Soil Science*, 51, 54-65. <https://doi.org/10.1134/S1064229318010155>.

Weber, D.D. & Englund, E.J. (1994). Evaluation and comparison of spatial interpolators II. *Mathematical Geology*, vol. 26, no. 4, pp. 589–603. DOI: 10.1007/BF02089243.

Webster, R. 2001. Statistics to support soil research and their presentation. *European Journal of Soil Science* 52. 331-340.

Weil, R. R. et Brady, N. C. (2017). *The Nature and Properties of Soils*. 15e édition. Pearson Prentice Hall. Upper Saddle River, État de New-York, États-Unis d'Amérique. 1 086 pages.

Williams, J. R., & Bemdt, H. D. (1972). Sediment Yield Computed With Universal Equation. *Journal of the Hydraulics Division*, 98, Article No Hy 12. <https://trid.trb.org/View/103301>

Williams, J.R. (1975). "Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor." In: Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yield and Sources (pp. 244– 252). Oxford, Mississippi: United States Department of Agriculture. ARS- S40, Washington, DC.

Williams, J.R. (1983). "Sediment Delivery Ratio: A Simplified Approach for Estimating Sediment Delivery." *Journal of Soil and Water Conservation*, 38(4), 280-285.

Wischmeier, W.H., Smith D.D. (1978). Predicting Rainfall Erosion Losses - À Guide to Conservation Planning. In Agriculture Handbook, n° 537, Department of Agriculture Science and Education Administration, Washington, District of Columbia USA. U.S.

Wischmeier, W.H., Smith, D.D. (1965). Predicting Rainfall Erosion Losses from Crop land East of the Rocky Mountains: A Guide for Selection of Practices for Soil and Water Conservation. USDA-ARS.

Wu, L., He, Y., & Ma, X. (2020). Using five long time series hydrometeorological data to calibrate a dynamic sediment delivery ratio algorithm for multi-scale sediment yield predictions, *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 16377-16392, <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08121-8>.

Wu, L., Liu, X., & Ma, X. (2018a). Research progress on the watershed sediment delivery ratio. *International Journal of Environmental Studies*, 75(4), 565–579. <https://doi.org/10.1080/00207233.2017.1392771>

Wu, L., Yao, W., & Ma, X. (2018b). Using the comprehensive governance degree to calibrate a piecewise sediment delivery ratio algorithm for dynamic sediment predictions: A case study in an ecological restoration watershed of northwest China. *Journal of Hydrology*, 564, 888–899. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.07.072>

Xie, W. C., & Li, T. H. (2012). Research comment on watershed sediment delivery ratio. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 48(4), 685-694.

Yadeta, S. K., Nega, T. E., Berhanu, G. S., and Atinkut, H. B. (2021). Modeling soil erosion using RUSLE and GIS at watershed level in the Upper Beles, Ethiopia. *Environmental Challenges*, 2: 100009.

- Yao, P., Su, M., Wang, Z., Rijn, L., Stive, M., Xu, C., & Chen, Y.** (2022). Erosion Behavior of Sand-Silt Mixtures: Revisiting the Erosion Threshold, *Water Resources Research*, 58, <https://doi.org/10.1029/2021WR031788>,
- Yazidhi, B.** (2003). A Comparative Study of Soil Erosion Modeling in Lom Kao-Phetchabun, M.Sc Thesis, ITC, Netherlands.
- Zachar, D.** (2011). *Soil Erosion*. Elsevier, 544 pages.
- Zerihun, M., Mohammedyasin, M. S., Sewnet, D., Adem, A. A. & Lakew, M.** (2018). Assessment of soil erosion using RUSLE, GIS and remote sensing in NW Ethiopia. *Geoderma Regional*. 12, 83-90. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2018.01.002>.
- Zhang, K., Li, S., Peng, W., Yu, B.** (2004). Erodibility of agricultural soils on the Loess Plateau of China. *Soil and Tillage Research* 76 (2): 157-165.
- Zhao, X. G., & Shi, H.** (2002). The Change of the Sédiment Delivery Ratio From the Slope and Water-Collected Plot in the Gull Région of Loess Plateau. *Journal of Mountain Research*, 20(6), 718D722.