

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

المدرسة الوطنية العليا للفلاحة
الحراش - الجزائر
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE
El-Harrach – ALGER



Département des Sciences du Sol

Thèse

En vue de l'obtention du diplôme de Doctorat en Sciences Agronomiques
Spécialité : Science du sol

THEME

*Cartographie de l'érosion par télédétection et SIG
dans le bassin versant de l'Oued El Hachem (nord
de l'Algérie)*

Présentée par : M. SAOUD Mohammed

Soutenue le : 03 juillet 2023

Devant le Jury composé de :

. M. DJILI K.	Professeur, ENSA d'El-Harrach	Président du jury
. M. MEDDI M.	Professeur, ENSH de Blida	Directeur de thèse
. M. LATATI M.	Professeur, ENSA d'El-Harrach	Co-directeur de thèse
. M. LARIBI A.	M. C. A., ENSA d'El-Harrach	Examineur
. Mme. HALLOUZ F.	M. C. A., Université de Khemis Miliana	Examinatrice
. Mme. TAIBI S.	M. C. A., Université de Blida 1	Examinatrice

Année universitaire 2022/2023

TABLE DES MATIERES

	Page
INTRODUCTION	1
Première partie : Etude bibliographique	
1. Généralités sur l'érosion hydrique	5
1.1. Définition de l'érosion hydrique.....	5
1.2. Causes de l'érosion hydrique.....	5
1.3. Impact et conséquences de l'érosion hydrique	7
1.4. Tolérance des terres à l'érosion hydrique	8
1.5. Différentes formes de l'érosion hydrique	9
1.5.1. Erosion par éclaboussures (<i>splash erosion</i>)	9
1.5.2. Erosion en nappe (<i>sheet erosion</i>)	10
1.5.3. Erosion linéaire	11
1.5.4. Erosion en masse.....	12
a. Le glissement lent ou la reptation (<i>creeping</i>)	13
b. Le glissement de terrain (<i>landslide</i>)	13
c. Les coulées boueuses (<i>mudflow</i>)	13
1.6. Facteurs de l'érosion hydrique.....	13
1.6.1. Les précipitations	13
1.6.2. La couverture pédologique.....	14
1.6.3. Le couvert végétal.....	15
1.6.4. La topographie	16
1.6.5. Les pratiques anti-érosives.....	18
2. Modélisation de l'érosion hydrique	20
2.1. Modèles empiriques.....	20
2.2. Modèles conceptuels.....	20
2.3. Modèles physiques.....	21
2.4. Exemples de quelques modèles d'estimation de l'érosion hydrique	21
2.4.1. Equation universelle des pertes en sol (USLE).....	21
2.4.2. Équation universelle modifiée de la perte de sol (USLE-M).....	22

2.4.3. Équation universelle révisée de la perte de sol (RUSLE).....	23
2.4.4. RUSLE-3D.....	23
2.4.5. Modèle SWAT (<i>Soil and Water Assessment Tool</i>).....	23
2.4.6. Modèle AGNPS (<i>Agricultural NonPoint Source</i>).....	24
2.4.7. Modèle WEPP (<i>Water Erosion Prediction Project</i>).....	25
2.4.8. Modèle EUROSEM (<i>EUROpean Soil Erosion Model</i>).....	25
2.4.9. Modèle ANSWERS (<i>Areal Nonpoint Source Watershed Response Simulation</i>).....	26
3. Télédétection et SIG dans l'évaluation de l'érosion hydrique.....	27
3.1. Systèmes d'information géographique (SIG).....	27
3.2. Télédétection.....	28
3.3. Évaluation de l'érosion hydrique par USLE basée sur SIG et télédétection: un aperçu.....	28
3.3.1. Estimation du facteur R.....	29
3.3.2. Estimation du facteur K.....	32
3.3.3. Estimation du facteur LS.....	36
3.3.4. Estimation du facteur C.....	37
3.3.5. Estimation du facteur P.....	39

Deuxième partie : Matériel et méthodes

1. Présentation de la zone d'étude	41
1.1. Caractéristiques topographiques et morphométriques du bassin.....	41
1.2. Caractéristiques climatologiques du bassin.....	44
1.2.1 Précipitations.....	44
1.2.2. Température.....	46
1.2.3. Diagramme Ombrothermique.....	46
1.2.4. Etage bioclimatique.....	47
1.3. Géologie.....	48
1.4. Occupation des sols.....	50
1.5. Réseau hydrographique.....	51
1.6. Barrage de Boukourdane.....	51
2. Méthodes et Techniques	53
2.1. Cartographie de l'érosion par USLE, SIG et télédétection dans le bassin versant de l'Oued El-Hachem (Nord de l'Algérie).....	53
2.1.1. Facteur R.....	54
2.1.2. Facteur K.....	54

2.1.3. Facteur LS	54
2.1.4. Facteur C	55
2.1.5. Facteur P	55
2.1.6. Influence de chaque facteur de l'USLE sur les pertes en sol.....	56
2.2. Estimation de l'érosion des sols et du rendement en sédiments dans le bassin versant de l'oued El Hachem (Algérie) en utilisant l'approche RUSLE-SDR.....	57
2.2.1. Estimation des pertes en sol	57
2.2.2. Calcul du rendement en sédiments.....	59
2.3. Etude diachronique de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'Oued El Hachem	61

Troisième partie : Résultats et discussion

1. Cartographie de l'érosion par télédétection et SIG dans le bassin versant de l'Oued El Hachem (Nord de l'Algérie).....	65
1.1. Résultats du facteur R	65
1.2. Résultats du facteur K.....	66
1.3. Résultats du facteur LS	69
1.4. Résultats du facteur C	70
1.5. Résultats des pertes en sol	71
1.6. Influence de chaque facteur sur les pertes en sol.....	73
1.7. Validation des résultats.....	76
1.8. Discussion.....	76
2. Estimation de l'érosion des sols et du rendement en sédiments dans le bassin versant de l'oued El Hachem (Algérie) en utilisant l'approche RUSLE-SDR	78
2.1. Résultats du facteur R.....	78
2.2. Résultats du facteur K.....	79
2.3. Résultats des facteurs LS et C	80
2.4. Résultats des pertes en sol, de la SDR et du rendement en sédiments	82
2.5. Simulations de perte de sol (A) et de rendement en sédiments (SY) en années sèches et pluvieuses	85
2.6. Discussion.....	88
3. Etude diachronique de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'Oued El Hachem	91
3.1. Validation de la classification par la matrice de confusion	91
3.2. Résultats de la classification par le maximum de vraisemblance.....	92

3.3. Variation interannuelle de l'occupation des sols	96
3.4. Evolution temporelle de l'érosion des sols dans le bassin versant de l'Oued El Hachem	97
3.5. Relation entre les pertes en sol moyennes et les classes d'occupation des sols	101
3.6. Discussion.....	103
DISCUSSION GENERALE	106
CONCLUSION GENERALE.....	108
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	110
ANNEXE DES PHOTOS	

RESUME

L'érosion hydrique est l'un des types les plus courants de dégradation des sols. Elle réduit la qualité du sol sur le site d'érosion et peut causer des problèmes de sédimentation sur le site de dépôt. L'Algérie fait partie des pays qui ont été affectés par l'érosion hydrique. Ce travail comprend (i) l'estimation des pertes en sol dans le bassin versant de l'Oued El Hachem en utilisant le modèle USLE et les techniques de SIG et de télédétection, (ii) l'estimation du rendement en sédiments par le modèle combiné RUSLE-SDR et l'examen de l'influence de l'érosivité des pluies sur l'érosion et le rendement en sédiments dans les années sèches et pluvieuses, et (iii) l'évaluation de la dynamique du changement d'occupation des sols dans l'espace et dans le temps et son influence sur l'érosion hydrique. Le taux d'érosion moyen (A) dans le bassin versant est estimé à 19,4 (t.ha⁻¹.an⁻¹) soit une perte totale de 426800 (t.an⁻¹). La corrélation entre (A) et les facteurs de topographie (LS), d'érosivité des pluies (R) et de couvert végétal (C) est hautement significative ($p < 0,01$) avec un coefficient de corrélation (r) de 0,999, 0,988 et 0,980, respectivement. La validation des résultats en comparant la perte moyenne en sol issue du modèle empirique de l'USLE au taux moyen d'envasement du barrage de Boukourdane a donné des résultats satisfaisants avec une différence de 7,6 (t.ha⁻¹.an⁻¹) par rapport à la valeur mesurée. L'utilisation du modèle RUSLE-SDR a montré que le modèle de Renfro a été choisi comme le meilleur modèle pour estimer le rendement en sédiments (SY), avec des taux d'erreur standard (SE), d'écart-type (SD), de coefficient de variation (CV) et d'efficacité de Nash–Sutcliffe (NSE) de 0,38%, 0,02, 0,07% et de 1,00, respectivement. Les résultats de la simulation de A et SY en années sèches et pluvieuses ont révélé que R est l'un des principaux facteurs affectant l'érosion du sol et le dépôt de sédiments dans le bassin versant de l'Oued El Hachem. Les résultats d'évaluation du changement d'occupation pendant 30 ans ont permis une augmentation des pertes moyennes annuelles de 23,9 à 24,5 t.ha⁻¹.an⁻¹. L'érosion est plus marquée dans les espaces bâtis, suivi par les sols nus, les terres agricoles et les matorrals. Alors qu'elle est quasiment nulle dans les forêts et nulle dans les plans d'eau. La relation entre les pertes en sol moyennes et les classes d'occupation des sols a fait ressortir une corrélation très hautement significative ($0,993 \leq r \leq 0,999$; $p < 0,01$), tout en soulignant le rôle du couvert végétal dans l'atténuation du processus érosif. Les deux modèles, USLE et RUSLE, ont démontré une fiabilité dans l'étude de l'érosion hydrique, tant au niveau des résultats des facteurs d'érosion que des cartes de distribution géographique des zones érodées. La comparaison des deux modèles empiriques a révélé que l'USLE a fourni une bonne estimation de A tout en respectant la fourchette des valeurs d'érosion de nappe mesurées en Algérie. Tandis que le RUSLE nous a permis d'estimer SY avec une très faible marge d'erreur par rapport aux données d'envasement annuel du barrage de Boukourdane. Ces résultats peuvent clairement aider à mettre en œuvre des plans de conservation des eaux et des sols pour la surveillance de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'Oued El Hachem. Cette approche pourrait être extrapolée dans d'autres régions présentant des caractéristiques climatiques et environnementales similaires de l'Afrique du Nord et de la région méditerranéenne.

Mots clés : Algérie ; Erosion hydrique ; Etude diachronique ; Oued El Hachem ; SIG ; Télédétection.

ملخص

يعد الانجراف المائي أحد أكثر أنواع تدهور التربة شيوعاً، حيث يقلل من جودة التربة في موقع التعرية ويمكن أن يسبب مشاكل الترسيب في موقع الترسيب. تعد الجزائر من بين الدول التي تأثرت بفعل عوامل الانجراف المائي. يشمل هذا العمل (1) تقدير خسائر التربة في مستجمع مياه وادي الهاشم، شمال الجزائر، باستخدام نموذج USLE وتقنيات نظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد، (2) تقدير حصيلة الرواسب من خلال نموذج RUSLE-SDR ودراسة تأثير التعرية المطرية على الانجراف المائي وكمية الرواسب في السنوات الجافة والرطبة، و (3) تقييم ديناميكيات تغير استخدام الأراضي في المكان والزمان وتأثيرها على الانجراف المائي. يقدر متوسط معدل الانجراف (A) في مستجمع المياه بـ 19.4 طن في الهكتار في السنة أو خسارة إجمالية قدرها 426800 طن سنوياً. أظهرت نتائج الترابط بين (A) من جهة، وعوامل التضاريس (LS) والتعرية المطرية (R) والغطاء النباتي (C) من جهة أخرى، علاقة ذات دلالة إحصائية ($p < 0.01$) مع معامل ارتباط (r) يساوي 0.999 و 0.988 و 0.980 على التوالي. وقد أعطى التحقق من صحة النتائج، من خلال مقارنة متوسط خسارة التربة باستخدام نموذج USLE بمتوسط معدل الترسيب في سد بوكوردان، نتائج مرضية بفارق 7.6 طن في الهكتار في السنة عن القيمة المقاسة. أظهر استخدام نموذج RUSLE-SDR أنه تم اختيار نموذج Renfro كأفضل نموذج لتقدير كمية الرواسب (SY) مع خطأ قياسي (SD) وانحراف معياري (SD) ومعامل الاختلاف (CV) وكفاءة Nash-Sutcliffe (NSE) بنسبة 0.38% و 0.02 و 0.07% و 1.00 على التوالي. أظهرت نتائج محاكاة A و SY في السنوات الجافة والممطرة أن R هو أحد العوامل الرئيسية التي تؤثر على انجراف التربة وتشكل الرواسب في مستجمع مياه وادي الهاشم. سمحت نتائج تقييم تغير استخدام الأراضي على مدى 30 عاماً، بزيادة في متوسط خسائر التربة من 23.9 إلى 24.5 طناً في السنة. تظهر آثار الانجراف بشكل أكثر وضوحاً في المناطق المبنية، تليها التربة الجرداء والأراضي الزراعية والجنابات. في حين أنه يكاد يكون منعدماً في الغابات ومنعدماً تماماً في المسطحات المائية. أظهرت العلاقة بين متوسط خسارة التربة ومختلف فئات استخدام الأراضي علاقة ارتباط ذات دلالة إحصائية ($0.993 \geq r \geq 0.999$; $p > 0.01$) مع إبراز دور الغطاء النباتي في التخفيف من عملية الانجراف. أثبتت كلا النموذجين، USLE و RUSLE، موثوقيتهما في دراسة الانجراف المائي، سواء في نتائج عوامل الانجراف أو في خرائط التوزيع الجغرافي للمناطق المنجرفة. كشفت المقارنة بين النموذجين التجريبيين أن نموذج USLE قدم تقديراً جيداً لخسائر التربة مع احترام نطاق قيم الانجراف المائي المقاسة في الجزائر. بينما سمح لنا نموذج RUSLE بتقدير كمية الرواسب بهامش خطأ صغير جداً مقارنة بمعدلات الترسيب السنوية لسد بوكوردان. يمكن أن تساعد هذه النتائج بشكل واضح في تنفيذ خطط الحفاظ على المياه والتربة لتحديد من مخاطر الانجراف المائي في مستجمع المياه في وادي الهاشم. كما يمكن استقراء هذه المنهجية في مناطق أخرى ذات خصائص مناخية وبيئية مماثلة في شمال إفريقيا ومنطقة البحر الأبيض المتوسط.

الكلمات المفتاحية: الاستشعار عن بعد؛ الانجراف المائي؛ الجزائر؛ دراسة تاريخية؛ نظم المعلومات الجغرافية؛ وادي الهاشم.

ABSTRACT

Water erosion is one of the most common types of soil degradation. It reduces soil quality at the erosion site and may cause sedimentation issues at the deposition site. Algeria is one of the countries affected by water erosion. This work includes (i) estimation of soil loss in the Wadi El Hachem watershed using the USLE model and GIS and remote sensing techniques, (ii) estimating sediment yield by the combined RUSLE-SDR model and examining the influence of rainfall erosivity on erosion and sediment yield in dry and wet years, and (iii) evaluating the dynamics of land use change in space and time and its influence on water erosion. The average erosion rate (A) in the watershed is estimated to be 19.4 (t.ha⁻¹.yr⁻¹) or a total loss of 426800 (t.yr⁻¹). The correlation between (A) and the factors of topography (LS), rainfall erosivity (R) and vegetation cover (C) is highly significant ($p < 0.01$) with a coefficient of correlation (r) of 0.999, 0.988 and 0.980, respectively. The validation of the results by comparing the average soil loss from the empirical USLE model to the average siltation rate of Boukourdane dam gave satisfactory results with a difference of 7.6 (t.ha⁻¹.yr⁻¹) from the measured value. The use of the RUSLE-SDR model showed that the Renfro model was selected as the best model for estimating the sediment yield (SY), with standard error (SE), standard deviation (SD), coefficient of variation (CV), and Nash–Sutcliffe efficiency (NSE) values of 0.38%, 0.02, 0.07%, and 1.00, respectively. The simulation results of A and SY in dry and rainy years revealed that R is one of the main factors affecting soil erosion and sediment deposition in the Wadi El Hachem watershed. The evaluation results of occupation change over 30 years have allowed for an increase in average annual soil losses from 23.9 to 24.5 t.ha⁻¹.yr⁻¹. Erosion is most pronounced in built-up areas, followed by bare soils, agricultural lands and shrubs. While it is almost zero in forests and zero in water bodies. The relationship between the average soil loss and land use classes showed a significant correlation ($0.993 \leq r \leq 0.999$; $p < 0.01$), while highlighting the role of vegetation cover in attenuating the erosive process. Both the USLE and RUSLE models demonstrated reliability in the study of water erosion, both in terms of the erosion factors results and geographical distribution maps of the eroded areas. The comparison of the two empirical models revealed that the USLE provided a good estimate of A while respecting the range of sheet erosion values measured in Algeria. While the RUSLE allowed us to estimate SY with a very small margin of error compared to the annual siltation data of Boukourdane dam. These results can clearly help to implement water and soil conservation plans for monitoring water erosion in the Wadi El Hachem watershed. This approach could be extrapolated to other areas with similar climatic and environmental characteristics in North Africa and the Mediterranean region.

Keywords: Algeria; Diachronic study; GIS; Remote sensing; Wadi El Hachem; Water erosion.