

THESE

En vue de l'obtention du : **DOCTORAT en sciences**

Structure de Recherche : Laboratoire de Géophysique et Risques Naturels

Discipline : Science de la Terre

Spécialité : Géomatique, Géomorphologie, Risques Naturels et Environnement

Présentée et soutenue le 09 décembre 2024 par :

Mohammed EL BRAHIMI

Évaluation des risques d'érosion de surface et profonde à oued Amtar (Rif, Maroc)

Apport des outils géomatiques et de machine Learning

JURY

Mohammed FEKHAOUI	PES,	Institut Scientifique, Université Mohammed V, Rabat.	Président / Rapporteur
El Mostafa MILI	PES,	Faculté des Sciences, Université Moulay Ismail, Meknès.	Rapporteur/ Examineur
Driss SADKAOUI	MCH,	Faculté des Sciences, Université Abdelmalek Essaâdi, Tétouan.	Rapporteur/ Examineur
Bouchta EL FELLAH	PES,	Institut Scientifique, Université Mohammed V, Rabat.	Invité
Brahim BENZOUAGAH	MCH,	Institut Scientifique, Université Mohammed V, Rabat.	Co-Directeur de thèse
Mohamed MASTERE	PES,	Institut Scientifique, Université Mohammed V, Rabat.	Directeur de thèse

Année Universitaire : 2023 - 24

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à tous ceux que j'aime mais surtout :

*À ma très chère épouse **Loubna**,*

Ton amour, ta patience, ton soutien indéfectible et tes encouragements constants ont été un pilier essentiel tout au long de la réalisation de ce travail de recherche exigeant. Sans ta présence bienveillante à mes côtés, l'équilibre entre mes responsabilités professionnelles, académiques et familiales n'aurait pu être maintenu. Je te dédie cette thèse, fruit de notre engagement mutuel.

*A mes chères enfants, **Razan, Nada et Yahya**,*

C'est dans leur amour immense et leur profond attachement affectif que je puise la force pour surmonter les moments difficiles et retrouver à chaque fois, l'entrain et le courage pour continuer...

*À mon très cher père **Mohamed El Brahimi**,*

Vos encouragements incessants et votre aide précieuse ont été le moteur qui m'a permis de surmonter les défis de ce parcours doctoral. Votre soutien indéfectible a été un élément clé de la réussite de ce projet si important à mes yeux. Je vous dédie ce travail, en reconnaissance de votre rôle essentiel dans ma vie.

*À ma très chère mère **Lakbira EL GOUZAMI**,*

Votre amour inconditionnel et votre tendresse maternelle ont été une source intarissable de réconfort et d'inspiration tout au long de la réalisation de cette thèse. Votre présence bienveillante et votre soutien inconditionnel ont été un pilier inestimable sur lequel je me suis appuyé pour mener à bien ce projet académique. C'est avec une profonde gratitude que je vous dédie ce travail, en hommage à votre rôle de guide et de soutien tout au long de mon parcours.

*À mon très cher frère **Noureddine** et à mes chères sœurs : **Fatima, Fatna, Aicha et Hanane**,*

À ma famille,

A tous les membres de la famille, grands et petits, Que ces modestes lignes leur servent de témoignage à mon attachement inconditionnel, inébranlable et permanent au lien sacré de la famille.

A Tous ceux qui ont pensé à moi

Remerciements

Cette thèse de doctorat s'inscrit dans le contexte de l'étude des risques d'érosion hydrique, et des mouvements de terrain dans le bassin versant de l'oued Amtar au Rif du Maroc réalisée au sein du Laboratoire de géophysique et de risques naturels, à l'Institut scientifique de Rabat. Cette thèse est pour moi une formidable expérience très enrichissante tant sur le plan scientifique qu'humain. C'est l'aboutissement de plusieurs années de travail auquel ont fait part des scientifiques de plusieurs disciplines. À ce titre, la reconnaissance et la gratitude sont de mise. À l'issue de ces années de recherche, c'est avec un grand plaisir que je fais la synthèse de mes investigations. Mais avant tout, je tiens à remercier l'ensemble des personnes qui ont contribué de près ou de loin, à la réalisation de ce travail. Je tiens d'abord à remercier tous les professeurs membres du département de géomorphologie et géomatique (D2G) de l'Institut scientifique pour leurs conseils et leurs qualités humaines, et aussi pour l'estime qu'ils ont toujours manifestée à mon égard.

*Je tiens également à remercier au premier lieu et tout particulièrement mes directeurs de thèse : À l'honorable Professeur **Bouchta EL FELLAH**, après votre départ à la retraite bien mérité, je tiens à vous exprimer ma plus profonde gratitude pour votre encadrement exceptionnel lors des premiers stades de cette thèse. Vos conseils avisés, votre expertise pointue et votre sens pédagogique hors pair ont été des piliers essentiels dans la réalisation de ce travail de recherche. Aujourd'hui, je vous exprime mes sincères remerciements pour votre contribution inestimable. Vous resterez pour moi un modèle d'excellence académique et d'humanité. Veuillez trouver ici l'expression de mon profond respect et de ma haute estime.*

*Ensuite, je tiens à faire part de ma gratitude et mes sincères remerciements à mon directeur de thèse, le Professeur **Mohamed MASTERE**, d'une part pour m'avoir offert l'opportunité de réaliser cette thèse dans les meilleures conditions possibles, et d'autre part pour ses directives et ses précieux conseils prodigués durant toutes les étapes de préparation de ma thèse. Il m'a encadré avec efficacité, sagesse et rigueur scientifique. Je garderai toujours pour lui une grande estime et une profonde admiration tant pour ses compétences scientifiques que pour ses qualités humaines.*

*Je tiens également à exprimer ma profonde reconnaissance à mon co-directeur de la présente thèse, le Professeur **Brahim BENZOUAGH**, pour sa disponibilité, sa bienveillance, ses judicieux*

conseils et ses directives éclairées. Qu'il trouve ici l'expression de mon profond respect et de ma haute considération pour ses remarquables qualités professionnelles et humaines.

La disponibilité et la générosité dont il a fait preuve tout au long de l'encadrement de ce travail ont été un soutien inestimable. Ses orientations pertinentes et son accompagnement attentif m'ont permis de mener à bien ce projet académique exigeant.

Je le remercie sincèrement pour son engagement sans faille et son dévouement exemplaire envers la réussite de cette recherche. Son expertise pointue alliée à sa grande humanité ont été des atouts précieux tout au long de ce parcours.

Je tiens à remercier les membres du jury :

Je remercie très vivement **Mohammed FEKHAOUI**, Professeur de l'enseignement supérieur, à Institut Scientifique, Université Mohammed V, Rabat., je vous remercie pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de présider mon jury et d'examiner ce travail malgré son calendrier très serré.

Je remercie très sincèrement **El Mostafa MILI**, Professeur de l'enseignement supérieur, à Faculté des Sciences, Université Moulay Ismail, Meknès, de l'honneur qu'il me fait en siégeant dans mon jury et d'avoir souscrit à la tâche d'être rapporteur de ma thèse malgré ses nombreuses occupations.

J'adresse mes considérations sincères à Monsieur **Driss SADKAOUI**, Professeur à faculté des Sciences, Université Abdelmalek Essaâdi, Tétouan, Je tiens à lui exprimer toute ma gratitude d'avoir accepté d'être rapporteur de ce travail et d'avoir bien voulu m'honorer de sa présence au jury malgré ces engagements scientifiques, administratives et ses déplacements.

Ma vive gratitude va également à Monsieur **Bouchta EL FELLAH**, Professeur de l'enseignement supérieur, à Institut Scientifique, Université Mohammed V, Rabat, d'avoir accepté d'être l'un des examinateurs de cette thèse.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à l'ensemble des personnels du Centre d'études doctorales en Sciences et Technologies de Rabat (CEDESTR). Votre soutien inestimable, vos conseils avisés et votre dévouement ont grandement contribué à la réalisation de ce travail de recherche. Grâce à votre engagement et à votre professionnalisme, et à vos missions qui consistent à mettre en place des formations doctorales et à accueillir et inscrire les doctorants, j'ai pu bénéficier d'un environnement académique stimulant et propice à l'accomplissement de mes objectifs, Je vous remercie sincèrement pour votre précieuse contribution à mon développement scientifique et personnel.

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon chef de service, le colonel **Rachid BOUAMEUR** chef de service ciné-photo de la gendarmerie Royale marocaine, pour son soutien indéfectible et ses encouragements constants tout au long de mon parcours académique. Grâce à son autorisation et à sa bienveillance, j'ai pu entamer et poursuivre mes études depuis la licence professionnelle en cartographie géomatique, jusqu'à la finalisation de cette thèse. Sa confiance en mes capacités et ses précieux conseils m'ont permis de relever le défi exigeant de concilier mes responsabilités professionnelles avec les exigences de la recherche scientifique. Son accompagnement a été une source d'inspiration et de motivation, et je lui suis sincèrement reconnaissant pour tout ce qu'il a fait pour m'aider à atteindre cet objectif, ainsi que tous les éléments de service ciné-photo, pour leur collaboration et leur aide précieuse lors de la réalisation de ce travail. Je vous remercie infiniment.*

Enfin, je réitère mes remerciements à toutes les personnes qui, de près ou de loin, m'ont aidé dans la finalisation de cette thèse.

Résumé

L'érosion hydrique, principale cause de dégradation des sols et de risques naturels comme les mouvements de terrain et les inondations, est particulièrement préoccupante au Maroc, surtout en zones montagneuses. Le bassin versant de l'oued Amtar, au Rif central, illustre cette problématique, où le relief accidenté, la faible couverture végétale et les changements climatiques intensifient l'érosion. Le présent travail s'attache à évaluer, cartographier et hiérarchiser les zones à risque d'érosion hydrique en s'appuyant sur la télédétection spatiale et les systèmes d'information géographique (SIG). Les méthodes incluent l'analyse morphométrique, le modèle Gavrilovic (EPM), l'équation universelle révisée (RUSLE), ainsi que de la susceptibilité aux mouvements de terrain via la régression logistique (LR), Random Forest (RF), et Support Vector Machine (SVM). Les résultats ont permis d'identifier les zones à risque et d'estimer les pertes en sol (en t/ha/an), ainsi que de prédire la susceptibilité aux mouvements de terrain. Ces résultats montrent que l'intensité de l'érosion et des mouvements de masse dépend de l'occupation des sols, de la nature des terrains et des pentes. Les modèles utilisés présentent tous des performances significatives avec des précisions supérieures à 90%. Ces dernières démontrent que les trois modèles ont une capacité de prédiction élevée. Plus spécifiquement, les valeurs d'AUC (Aire Sous la Courbe ROC) indiquent que les modèles RF et LR ont une meilleure performance que le modèle SVM. Les scores AUC obtenus sont de 0,93 pour RF, 0,90 pour LR et 0,91 pour SVM. Ces mesures de performance statistiques et visuelles démontrent que le modèle RF est le plus puissant et le plus performant pour classifier ce type de risque naturel.

Les résultats de cette étude pourraient contribuer à la durabilité environnementale et à la viabilité économique du bassin versant, offrant une feuille de route pour les décideurs locaux, régionaux et centraux dans la gestion des risques et le développement du bassin.

Mots clés : Érosion hydrique, Mouvement de terrain, susceptibilité, cartographie, Modèles (RSULE-EPM-LR-RF-SVM), Analyse Morphométrique, bassin versant Amtar, le Rif, Maroc.

Abstract

Hydric erosion, the main cause of soil degradation and natural hazards such as landslides and floods, is particularly concerning in Morocco, especially in mountainous areas. The Oued Amtar watershed, located in central Rif, illustrates this issue, where the rugged terrain, sparse vegetation cover, and climate change exacerbate erosion. This work aims to assess, map, and prioritize areas at risk of hydric erosion by relying on remote sensing and Geographic Information Systems (GIS). The methods include morphometric analysis, the Gavrilovic model (EPM), the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), as well as landslide susceptibility using Logistic Regression (LR), Random Forest (RF), and Support Vector Machine (SVM). The results allowed for the identification of risk zones and the estimation of soil losses (in t/ha/year), as well as predicting landslide susceptibility. These findings show that the intensity of erosion and mass movements depends on land use, the nature of the terrain, and slopes. All the models used to demonstrate significant performances, with accuracy exceeding 90%. These results indicate that the three models have a highly predictive capacity. Specifically, the AUC (Area Under the ROC Curve) values show that the RF and LR models outperform the SVM model. The obtained AUC scores are 0.93 for RF, 0.90 for LR, and 0.91 for SVM. These statistical and visual performance measures demonstrate that the RF model is the most powerful and efficient for classifying this type of natural hazard.

The results of this study could contribute to environmental sustainability and the economic viability of the watershed, providing a roadmap for local, regional, and central decision makers in risk management and watershed development.

Keywords: Hydric erosion, Landslide, Susceptibility, Mapping, Models (RUSLE-EPM-LR-RF-SVM), Morphometric Analysis, Amtar Watershed, Rif, Morocco.

تعد التعرية المائية السبب الرئيسي لتدهور التربة والمخاطر الطبيعية مثل الانهيارات الأرضية والفيضانات، وهي مصدر قلق خاص في المغرب، لا سيما في المناطق الجبلية، ويمثل حوض وادي أطار المتواجد في الريف الأوسط مثالاً لهذه المشكلة، حيث إن التضاريس الوعرة وضعف الغطاء النباتي والتغيرات المناخية تزيد من حدة التعرية، كما يهدف هذا العمل إلى تقييم ورسم الخرائط وتصنيف المناطق المعرضة لخطر التعرية المائية باستخدام الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية (GIS)، وتشمل كذلك طرق التحليل المورفومتري، و نموذج جافريلوفيتش، طريقة الإمكانية التعرية (EPM)، معادلة فقدان التربة العالمية المعدلة (RUSLE)، بالإضافة إلى تحليل الحساسية للحركات الأرضية باستخدام الانحدار اللوجستي (LR)، الغابات العشوائية (RF)، وآلة ناقل الدعم (SVM).

النتائج المحصل عليها سمحت لنا بتحديد المناطق المعرضة للخطر وتقدير فقدان التربة ب (طن/هكتار/سنة)، وكذلك التنبؤ بحساسية الحركات الأرضية على شكل خرائط. ولقد بينت هاته النتائج أن شدة التعرية والحركات الجماعية تعتمد على استخدامات الأراضي، طبيعة التضاريس، والانحدارات، كما أظهرت النماذج المستخدمة في هذه الدراسة أداءً كبيراً بدقة تفوق 90%، مما يدل على قدرة توقعية عالية. وبشكل خاص، تشير قيم ROC (AUC) المساحة تحت منحنى، إلى أن نماذج الغابات العشوائية (RF) والانحدار اللوجستي (LR) تفوق أداء نموذج آلة ناقل الدعم (SVM).

أما بالنسبة لدرجات معدل الاستخدام الأمثل (AUC) التي تم الحصول عليها هي 0.93 بالنسبة ل (RF)، و 0.90 بالنسبة ل (LR)، و 0.91 في حالة (SVM). من خلال مقاييس الأداء الإحصائية والبصرية يتبين لنا أن نموذج (RF) هو الأقوى والأفضل أداءً لتصنيف هذا النوع من المخاطر الطبيعية.

يمكن لنتائج هذه الدراسة أن تساهم في الاستدامة البيئية والجدوى الاقتصادية لمستجمعات المياه، وتوفر خارطة طريق لصانعي القرار المحليين والإقليميين والمركزيين في إدارة المخاطر وتنمية مستجمعات المياه.

الكلمات المفتاحية: التآكل المائي، الانجراف المائي، الانهيارات الأرضية، قابلية التأثير، رسم الخرائط، النماذج (EPM-RUSLE-RF-LR-SVM)، التحليل المورفومتري، مستجمع أطار المائي، الريف، المغرب.

Table des abréviations

ABH	: L'Agence du bassin hydraulique du Loukkos
A	: Superficie du bassin versant (km^2)
AEE	: Agence européenne pour l'environnement
ALOS	: Advanced land observation satellite
ASTER	: The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
AUC	: Area Under the Curve, aire sous la courbe
BV	: Bassin versant
Dd	: Densité du drainage (km/km^2)
DEM	: Digital elevation model
EC	: L'énergie cinétique (joules)
EPM	: (Erosion potential model), modèle d'érosion potentielle
ESA	: Agence spatiale européenne
FAO	: Food and Agriculture Organization of UN, L'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture est une organisation spécialisée du système des Nations unies, créée en 1945 à Québec Son siège est à Rome, au Palazzo FAO, depuis 1951
HRS	: Haute résolution spatiale
Ip	: Intensité de pluie en mm/h
KG	: indice de compacité de Gravelius
L	: Longueur totale des cours d'eau (km)
lg	: Indice de pente global
LR	: Logistic regression
M.O	: Matière organique
ML	: Machine Learning, Apprentissage automatique l'étude des algorithmes informatiques qui peuvent s'améliorer automatiquement grâce à l'expérience et à l'utilisation de données
MNA	: Modèle numérique d'altitude (MNA) offre une représentation numérique du relief d'un territoire généré à partir de données altimétriques (altitude) et planimétriques (rectangulaires ou géographiques)
MNE	: Modèle Numérique d'élévation (MNE) est une version améliorée du modèle numérique de terrain qui comprend, non seulement les altitudes cartographiées du sol brut, mais aussi les élévations réelles des bâtiments ou flore naturelle

MNT	: Modèle numérique de terrain (MNT) est une représentation de la topographie (altimétrie et/ou bathymétrie) d'une zone terrestre (ou d'une planète tellurique) sous une forme adaptée à son utilisation par un calculateur numérique (ordinateur)
MT	: Mouvements de terrain
O	: Oued
OSTRM	: Office régional scientifique et technique d'Outre-Mer
P	: Périmètre du bassin versant (km)
QGIS	: Quantum gis
QR	: Débit de ruissellement
RF	: Random forest , Forêt aléatoire
ROC	: Receiver Operating Characteristic curve. Courbe du taux de vrais positifs en fonction du taux de faux positifs à différents seuils de classification
ROI	: Region of interest, Région d'intérêt
RUSLE	: Revised Universal Soil Loss Equation, l'équation universelle de la détermination des pertes en sol version révisée
SBV	: Sous-bassin versant
SIG	: Systèmes d'information géographique
SVM	: Support Vector Machine, Modèles d'apprentissage supervisé avec algorithmes d'apprentissage associés qui analysent les données pour la classification et l'analyse de régression
THRS	: Très haute résolution spatiale
USLE	: Universal Soil Loss Equation, c'est l'équation universelle de la détermination des pertes en sol

Liste des tableaux

Tableau 1 : Recensement de la population du bassin versant de l’oued Amtar par communes en 2004 et 2014	41
Tableau 2 : fréquences et pourcentages cumulés de la surface du bassin versant.....	44
Tableau 3 : Répartition des classes des pentes du bassin versant de l’oued Amtar.....	50
Tableau 4 : Classification du relief selon Ig donné par l’ORSTOM.....	53
Tableau 5 : Longueur des cours d’eau traversant la commune.....	74
Tableau 6 : Apports annuels moyens.	74
Tableau 7 : Bilan de la nappe d’Amtar (ABHL2014).....	75
Tableau 8 : Méthodes de calcul des paramètres morphométriques.....	87
Tableau 9 : Nombre de cours d’eau dans les sous-bassins de l’oued Amtar	93
Tableau 10 : La longueur totale et la longueur moyenne du flux des sous bassin versant de l’oued Amtar	94
Tableau 11 : Bifurcation Ratio des sous-bassins de l’oued Amtar.....	96
Tableau 12 : Résultats de calcul par sous-bassin versant des paramètres morphométriques surfaciques du bassin de l’oued Amtar	102
Tableau 13 : Matrice de corrélation des paramètres morphométriques pour sous-bassins versants de l’oued Amtar.....	104
Tableau 14 : Classements hiérarchisés des sous-bassins versants à l’aide de paramètres morphométriques.	107
Tableau 15 : Degrés d’érosion en fonction du coefficient Z (Gavrilovic Z. & al., 2006).....	119
Tableau 16 : Type de sol en fonction de (Gavrilovic, 1962 ; 1970).	120
Tableau 17 : Codification de la structure des sols (Wischmeier et Smith, 1978).	121
Tableau 18 : Codification de la perméabilité des sols (Wischmeier et Smith, 1978).....	121
Tableau 19 : La classe de l’érosion en fonction de (Z) (Gavrilovic, 2006).	129
Tableau 20 : Degré d’érosion en fonction de la perte en sol (m ³ /km ² /an).....	135
Tableau 21 : Classement d’érosion dans le bassin versant de l’oued Amtar.	135
Tableau 22 : Données pluviométriques des stations de référence	147
Tableau 23 : Les principales valeurs du facteur C (couvert végétal) pour différents types d’occupation du sol :	151
Tableau 24 : Les différentes valeurs du facteur P (Wischmeier & Smith,1978).....	151
Tableau 25 : Calcul du facteur R dans les stations de référence.	152
Tableau 26 : Superficie et pourcentage des classes des pertes en sol en t/ha/an dans le bassin versant de l’oued Amtar.....	161
Tableau 27 : Analyse de la multicritère des facteurs d'occupation du sol.....	197

Liste des illustrations

Figure 1 : Construction en amont du talus.	12
Figure 2 : Erosion en nappe (photo d'oued Amtar du jeudi 9 mars 2023)	12
Figure 3 : Processus d'érosion linéaire, en griffes ou en rigoles (BV d'oued Amtar)	12
Figure 4 : Dégradation des routes à cause des instabilités de terrain	13
Figure 5 : des maisons s'effondrent à cause de l'érosion hydrique des sols et des glissements de terrain	13
Figure 6 : Dégradation des terrains agricole à cause des instabilités de terrain	14
Figure 7 : Hyperplans optimales séparateurs des zones à risque et zones non à risque	24
Figure 8 : Schéma de l'algorithme de la forêt aléatoire (Sahour et al., 2021)	26
Figure 9 : Modèle de la régression logistique	28
Figure 10 : Situation géographique de la zone d'étude (bassin versant de l'oued Amtar)	40
Figure 11 : Carte hypsométrique du bassin versant de l'oued Amtar	44
Figure 12 : Répartition de la surface totale en fonction d'altitude du bassin versant de l'oued Amtar	46
Figure 13 : Courbe hypsométrique du bassin versant de l'oued Amtar	46
Figure 14 : Rectangle équivalent du bassin versant de l'oued Amtar	47
Figure 15 : Carte de répartition des pentes du bassin versant de l'oued Amtar	51
Figure 16 : Carte d'agencement du réseau hydrographique du bassin versant d'oued Amtar en ordres	56
Figure 17 : Carte géomorphologique du Rif Central (Maurer, 1970)	59
Figure 18 : Répartition des trois grands domaines géologiques rifains : Domaine Interne, Domaine Externe et Nappes de flyschs (Modifié de Wildi, 1983).	61
Figure 19 : (A) Schéma montrant les subdivisions du rif interne ; (B) Logs stratigraphiques des terrains Sebtides ; (C) : coupe géologique montrant les relations structurales entre les différentes subdivisions du Rif interne (SGM, 1975) ; (D) : colonnes lithostratigraphiques	66
Figure 20 : Carte des faciès géologiques du bassin versant d'oued Amtar (El brahimi et al., 2023)	68
Figure 21 : Carte des mouvements récents du Rif 1/500000 (SGM,1992)	70
Figure 22 : Carte de situation de la station pluviométrique (station Afghal, ABHL)	71
Figure 23 : Précipitations moyennes interannuelles au niveau de la station (Afghal, ABHL)	72
Figure 24 : Précipitations annuelles à la station de Chefchaouen (2000-2020)	72
Figure 25 : Précipitations annuelles à la station de Chefchaouen (1944-2018)	73
Figure 26 : Carte du réseau hydrographique du bassin versant de l'oued Amtar (ABHL)	74
Figure 27 : Carte des ressources en eau souterraines du bassin versant de l'oued Amtar (ABHL)	76
Figure 28 : Carte du couvert forestier du bassin versant de l'oued Amtar (ABHL)	77
Figure 29 : Méthodologie du travail pour l'analyse morphométrique. (el brahimi et all, 2024)	85

Figure 30 : Carte des sous-bassins versants et du réseau hydrographique du bassin de l'oued Amtar	90
Figure 31 : Carte de l'ordre des cours d'eau du bassin versant de l'oued Amtar	92
Figure 32 : Cartes des paramètres morphométriques dans le bassin versant de l'oued Amtar	101
Figure 33 Carte de priorisation des sous-bassins versants de l'oued Amtar	106
Figure 34 : Organigramme du modèle Gavrilovic (EPM).	119
Figure 35 : Détails de la méthodologie EPM dans la zone d'étude (el brahimi et all , 2024)	119
Figure 36 : Carte des coefficients de susceptibilité des sols à l'érosion (facteur Y), du bassin versant de l'oued Amtar	122
Figure 37 : Carte des pentes JA (%) du bassin versant de l'oued Amtar	124
Figure 38 : Carte de protection des sols (Xa) basée sur le modèle EPM dans le bassin versant de l'oued Amtar	126
Figure 39 : Cartographie des coefficients du taux d'érosion (ϕ), dans le bassin versant de l'oued Amtar	128
Figure 40 : Carte du coefficient d'érosion Z dans le bassin versant de l'oued Amtar	130
Figure 41 : Carte du coefficient de la température de surface dans le bassin versant de l'oued Amtar	133
Figure 42 : Carte du coefficient des précipitations moyennes annuelles (H) du bassin versant de l'oued Amtar	134
Figure 43 : Carte des pertes de sol dans le bassin versant de l'oued Amtar	136
Figure 44 : Carte des cas d'évaluation du taux d'érosion du sol à l'aide du modèle EPM au Maroc : (a) : Bassin versant de l'Amter, (b) : Bassin versant de l'Inaouene, (c) : Bassin versant de Beht, (d) : Bassin versant de Ououmana, (e) : Bassin versant de Toudgha, (f) : bassin du Souss.	138
Figure 45 : Schéma méthodologique adopté pour déterminer les zones vulnérables aux risques d'érosion par RUSLE	146
Figure 46 : Carte de répartition des stations climatiques dans la région du bassin versant de l'oued Amtar	148
Figure 47 : Carte du facteur R du bassin versant de l'oued Amtar	154
Figure 48 : Carte lithologique et classes de friabilité des roches, du bassin versant de l'oued Amtar	156
Figure 49 : Carte du facteur topographique (LS) du bassin versant de l'oued Amtar	158
Figure 50 : (a) Carte du facteur C ; (b) Carte de l'indice de végétation par différence normalisée au niveau du bassin versant de l'oued Amtar	159
Figure 51 : Carte d'utilisation et Couverture des sols dans le Bassin Versant d'oued Amtar	160
Figure 52 : Carte des pertes en sol du bassin versant de l'oued Amtar	163
Figure 53 : Situation de la zone d'étude (Bassin versant de l'oued Amtar)	169
Figure 54 : Méthodologie de cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain par apprentissage automatique	170

Figure 55 : Carte de l'inventaire des mouvements de terrain, au niveau du bassin versant de l'oued Amtar	175
Figure 56 : Cartes des facteurs influençant l'occurrence des glissements de terrain : La pente (A), l'élévation (B), NDVI (C), LULC (D)	186
Figure 57 : Cartes du facteur de conditionnement des glissements de terrain : Aspect (E), Curvature (F), Distance aux faille (G), Distance aux routes (H)	191
Figure 58 : Cartes du facteur de conditionnement des glissements de terrain : Distance to Stream (I), Plan courbure (J), Profil courbure (K), TWI (L)	196
Figure 59 : Carte de lithologie a été construit à partir de la carte géologique de 1 :25000 de la zone d'étude	196
Figure 60 : Résultats du diagnostic de multicolinéarité des facteurs d'inflation de variance (VIF) et de tolérances	199
Figure 61 : Matrix de corrélation entre les différents facteurs du bassin versant de l'oued Amtar	200
Figure 62 : Pourcentage de surface des classes de susceptibilité aux glissements de terrain du bassin versant de l'oued Amtar, à l'aide des modèles de machine Learning (LR, RF et SVM).	201
Figure 63 : Cartes de susceptibilité aux glissements de terrain du bassin versant de l'oued Amtar, générées à l'aide de Modèles LR, RF, et SVM	202
Figure 64 : Les paramètres responsables aux glissements de terrain du bassin versant de l'oued Amtar	204
Figure 65 : Courbes de caractéristiques de fonctionnement du récepteur (ROC) empilées du modèle implémenté et leurs valeurs (AUC)	206
Figure 66 : Cartographie de l'inventaire géomorphologique des glissements de terrain actifs, élaboré par la mission terrain	207

Table des matières

Dédicaces	I
Remerciements.....	II
Résumé.....	V
Abstract.....	VI
المخلص	VII
Table des abréviations.....	VIII
Liste des tableaux.....	X
Liste des illustrations	XI
Table des matières.....	XIV
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART SUR L'ALEA, FACTEURS DECLENCHEURS ET CONSEQUENCES SUR LA STABILITE DES SOLS	7
Résumé du chapitre I	8
I.1. Problématique et objectifs de la thèse	9
I.1.1. Géomorphologie et vulnérabilité du Rif, risques d'érosion de surface et profonde	9
I.1.2. Facteurs aggravants	10
I.1.2.1. Le climat méditerranéen et les précipitations intenses	10
I.1.2.2. La déforestation et la dégradation de la couverture végétale	10
I.1.2.3. Les pratiques agricoles non durables.....	10
I.1.2.4. L'urbanisation et l'aménagement non planifiés.....	11
I.1.3. Conséquences environnementales, économiques et sociales	11
I.1.4. Besoin urgent d'une approche intégrée et durable	14
I.2. Organisation de la thèse.....	14
I.3. Concepts de base	15
I.3.1. Recherche associée	15
I.3.2. Questions de recherche	16
I.3.3. Données utilisées	17
I.4. Modèles et des méthodes utilisées.....	18
I.4.1. Analyse morphométrique.....	18
I.4.2. Modèle d'érosion potentielle (EPM).....	20
I.4.3. Équation universelle révisée de perte de sol (RUSLE)	21
I.4.4. Modèles d'apprentissage automatique (ML).....	22
I.4.4.1. Machine à vecteurs de support (SVM).....	23
I.4.4.2. Forêt aléatoire (RF)	25
I.4.4.3. Régression logistique (LR).....	26
I.4.5. Résultats et discussions	28
I.4.5.1. Prioritisation des zones à risque d'érosion hydrique par analyse morphométrique ..	28
I.4.5.2. Quantification des pertes en sol par modèle d'érosion potentielle (EPM).....	29
I.4.5.3. Quantification des pertes en sol par l'équation universelle révisée (RUSLE)	31
I.4.5.4. Cartographie de la susceptibilité aux glissements par les modèles (SVM ; RF et RL)	33
Conclusion du chapitre I.....	36
CHAPITRE II : PRESENTATION DU SECTEUR D'ETUDE	37
Résumé du chapitre II	38
II.1. Introduction	39
II.2. Bassin versant de l'oued Amtar.....	39
II.2.1. Situation géographique.....	39
II.2.2. Caractéristiques socio-économiques et démographiques	40
II.2.3. Caractéristiques physiques	41
Évaluation des risques d'érosion de surface et profonde à oued Amtar (Rif, Maroc)	
Apport des outils géomatiques et de machine Learning	XIV

II.2.3.1. Carte hypsométrique	42
II.2.3.2. Courbe hypsométrique	44
II.2.3.3. Le rectangle équivalent	46
II.2.3.4. Les caractéristiques d'altitudes	48
II.2.3.4.1. Altitudes minimales et maximales.....	48
II.2.3.4.2. Altitude moyenne	48
II.2.3.4.3. Altitude médiane	49
II.2.3.5. Etude de la pente	50
II.2.3.5.1. Pente moyenne du bassin versant.....	51
II.2.3.5.2. Indice de pente global (Ig)	52
II.2.3.6. Cadre Hydrographique	54
II.2.3.7. Densité de drainage	56
II.2.3.8. Cadre géomorphologique	57
II.2.3.9. Cadres géologiques	60
II.2.3.9.1. Généralités sur la chaîne du Rif	60
II.2.3.9.1.1. Domaine interne	61
II.2.3.9.1.2. Domaine des nappes de flysch.....	62
II.2.3.9.1.3. Zones Mésorifaine ou Mésorif	64
II.2.3.9.1.4. Zones pré-rifaines ou Pré-Rif	64
II.2.3.9.1.5. Le Pré-Rif interne.....	64
II.2.3.9.1.6. Le Pré-Rif externe	64
II.2.3.9.1.7. L'avant pays (les unités décollées et glissées).....	64
II.2.3.9.2. Cadre géologique du bassin versant de l'oued Amtar	67
II.2.3.10. Cadre géomorphologique	68
II.2.3.11. Cadre topographique	69
II.2.3.12. Cadre tectonique.....	69
II.2.3.13. Cadre climatique	70
II.2.3.14. Cadre hydrologique	73
II.2.3.14.1. Eau de surface	73
II.2.3.14.2. Eau souterraine.....	75
II.2.3.15. Cadre forestier	76
Conclusion du chapitre II	78

CHAPITRE III : ÉVALUATION DU RISQUE DE L'ÉROSION HYDRIQUE DANS LE BV DE L'OUED AMTAR PAR L'APPROCHE ANALYSE MORPHOMETRIQUE..... 79

Résumé du chapitre III.....	80
III.1. Introduction.....	81
III.2. Intérêts des systèmes d'information géographique (SIG) et l'imagerie pour l'évaluation de l'érosion	81
Quantification de l'érosion hydrique	82
Modélisation du risque d'érosion hydrique.	82
III.3. L'approche Analyse Morphométrique	82
III.3.1. Intérêt de l'analyse morphométrique	83
III.3.2. Données et logiciels utilisés pour l'analyse	83
III.3.3. Modélisation hydrologique pour la caractérisation des bassins versants à l'aide du SIG	85
III.3.4. Calcul des paramètres morphométriques	86
III.3.5. Classement des sous-bassins versants sur la base des résultats de l'analyse morphométrique	88
III.3.6. Détermination du classement moyen et de la priorité finale.....	88
III.3.7. Résultats et discussion	88
III.3.7.1. Délimitation des sous-bassins versants de l'oued Amtar	88
III.3.7.2. Calcul des paramètres morphométriques de l'oued Amtar	90
III.3.7.2.1. Aspect Linéaire	90

III.3.7.2.1.1. Ordre de flux (nu)	90
III.3.7.2.1.2. Nombre du flux (Nu)	92
III.3.7.2.1.3. Longueur totale et moyenne du flux	93
III.3.7.2.1.4. Ratio de longueur du flux	95
III.3.7.2.1.5. Bifurcation Ratio.....	95
III.3.7.2.1.6. Aspet de Forme	96
III.3.7.2.1.7. La densité de drainage (Dd).....	97
III.3.7.2.1.8. Nombre d'infiltrations (In)	98
III.3.7.2.1.9. Longueur de l'écoulement de surface (Lo).....	98
III.3.7.2.1.10. Constante de maintien du canal ©	99
III.3.7.2.1.11. Intensité du drainage (Din)	99
III.4. Matrice de corrélation des paramètres morphométriques pour les sous-bassins versants de l'oued Amtar.....	103
III.5. Priorisation des sous-bassins versants de l'oued Amtar	104
III.6. Validation des résultats de l'analyse morphométrique.....	108
III.7. Conclusions.....	108
Conclusion du chapitre III	110
CHAPITRE IV : ÉVALUATION DU RISQUE DE L'ÉROSION HYDRIQUE DANS LE BASSIN VERSANT DE L'OUED AMTAR A L'AIDE DE LA METHODE EPM.....	111
Résumé du chapitre IV	112
IV.1. Introduction	113
Méthodes empiriques	114
Méthodes de modélisation :	114
Méthodes de télédétection :	114
IV.2. Les Paramètres D'entrée du Modèle EPM.....	116
IV.3. Méthodologie d'application du modèle d'érosion potentielle de Gavrilovic (EPM).....	117
IV.4. Parametres utilises dans le modele d'érosion potentielle de gavrilovic (epm)	120
IV.4.1. Sensibilité de sol à l'érosion (Y).....	120
IV.4.2. Les pentes de la zone d'étude en <i>Ja</i> (%).....	123
IV.4.3. Coefficient de protection des sols (Xa)	124
IV.4.4. Coefficient du taux d'érosion (Φ)	126
IV.4.5. Coefficient d'érosion (Z).....	128
IV.5. Evaluation quantitative de l'érosion hydrique par le modèle de Gavrilovic (EPM).....	130
IV.5.1. Coefficient de la température (T)	131
IV.5.2. Coefficient de Précipitation moyenne annuelle en (H)	133
IV.5.3. Volume annuel moyen d'érosion estimé (W)	134
IV.6. Conclusion.....	137
Conclusion du chapitre IV	139
CHAPITRE V : ÉVALUATION DU RISQUE DE L'ÉROSION HYDRIQUE DANS LE BASSIN VERSANT DE L'OUED AMTAR PAR L'EQUATION RUSLE.....	140
Résumé du chapitre V	141
V.1. Définitions	142
V.2. Introduction	142
V.2.1. Aperçu sur l'équation de Wischmeier et Smith (USLE).....	143
V.2.2. Le modèle révisé de USLE : RUSLE	144
V.3. Description des facteurs d'érosion	146
V.3.1. Facteur R : Erosivité pluviale	146
V.3.2. Facteur K : Erodibilité des sols.....	148
V.3.3. Facteur LS : Topographie	149
V.3.4. Facteur C : Couvert végétal.....	150
V.3.5. Facteur P : Pratiques antiérosifs	151
V.3.6. Calcul de la dégradation spécifique des sols	152
V.4. Résultats et Discussion	152

V.4.1. Résultats des facteurs	152
V.4.1.1. Facteur R : Erosivité pluviale	152
V.4.1.2. Facteur K	155
V.4.1.3. Facteur LS	156
V.4.1.4. Facteur C	158
V.4.1.5. Facteur P	160
V.5. Quantification des pertes en sol (A) dans le bassin versant de l'oued Amtar.....	161
V.6. Conclusion.....	164
Conclusion du chapitre V	165
CHAPITRES VI : CARTOGRAPHIE DE LA SUSCEPTIBILITE AUX GLISSEMENTS DANS LE BASSIN VERSANT DE L'OUED AMTAR A L'AIDE DES MODELES DE MACHINE LEARNING	166
Résumé du chapitre VI.....	167
VI.1. Introduction.....	168
VI.2. Méthodologie.....	169
VI.3. Modèles d'application	171
VI.3.1. Modèle RF (Random Forest).....	171
VI.3.2. Modèle SVM (Support Vector Classifier)	172
VI.3.3. Modèle LR (Logistic Regresion).....	173
VI.4. Relation des systèmes d'information géographique (SIG) avec les modèles d'application	174
VI.5. Intégration des modèles d'application.....	175
VI.5.1. Complémentarité des approches	176
VI.5.2. Facteurs de prédisposition et de déclenchement des glissements de terrain	176
VI.5.3. Inclinaison de la pente	177
VI.5.4. Indice de végétation par différence normalisée	177
VI.5.5. Élévation.....	178
VI.5.6. Occupation du sol (LULC)	178
VI.5.7. Distance aux failles.....	179
VI.5.8. Distance aux rivières.....	179
VI.5.9. Courbure de plan et de profil.....	180
VI.5.10. Indice de position topographique TPI.....	180
VI.5.11. Indice d'humidité topographique TWI :.....	181
VI.5.12. Aspect de la pente	181
VI.5.13. Distance aux routes.....	181
VI.5.14. Lithologie.....	182
VI.6. Résultats.....	182
VI.6.1. Facteurs contribuant aux glissements de terrain.....	183
VI.6.1.1. Inclinaison de la pente (Slope)	183
VI.6.1.2. Élévation	183
VI.6.1.3. Occupation du sol (LULC)	184
VI.6.1.4. Aspect	187
VI.6.1.5. Courbure (Curvature).....	188
VI.6.1.6. Distance aux failles (Distance to fault).....	188
VI.6.1.7. Distance par rapport aux routes (Distance to road)	189
VI.6.1.8. Distance aux cours d'eau (Distance to stream)	192
VI.6.1.9. Courbures en plan et en profil (Plan Curvature, Profil curvature)	193
VI.6.1.10. Indice d'humidité topographique (TWI)	193
VI.6.1.11. Lithologie.....	194
VI.7. Analyse de multi multicritère.....	196
VI.8. Coefficient de corrélation de Pearson.....	199
VI.9. Cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain	200
VI.10. Discussion.....	203
VI.10.1. Analyse des paramètres responsables	203
VI.10.2. Performances et validation des modèles.....	204

CONCLUSION DU CHAPITRE VI	208
CONCLUSION GENERALE.....	209
BIBLIOGRAPHIE	213
ANNEXES.....	227

INTRODUCTION GENERALE

Notre planète se caractérise par des paysages diversifiés et souvent imprévisibles, marqués par de nombreuses menaces omniprésentes. Les catastrophes naturelles touchent un nombre croissant de personnes, entraînant des pertes humaines et des dommages matériels, ce qui provoque une augmentation des coûts financiers ([Bammou et al., 2024](#) ; [Wang et al., 2024](#)). En général, ces événements ont des conséquences graves pour les communautés locales, laissant des impacts durables qui peuvent nécessiter de nombreuses années pour se stabiliser et retrouver un semblant de normalité ([He et al., 2024](#)).

Les aléas, qu'ils soient d'origine naturelle ou humaine, représentent des incidents critiques qui influencent l'occurrence de divers risques tels que les tremblements de terre, les inondations, les incendies de forêt, les glissements de terrain, les tsunamis et les éruptions volcaniques ([Chen et al., 2018](#)). Ces catastrophes sont des manifestations violentes résultant des processus naturels de la Terre. L'ampleur d'une catastrophe dépend souvent de la vulnérabilité de la région face aux risques potentiels ([Benzougagh et al., 2020](#) ; [Bammou et al., 2024](#)).

Ces dernières années, nous avons été témoins de tremblements de terre ravageant des villes entières, d'incendies de forêt carbonisant des hectares de terre, de cyclones dévastant des propriétés et d'inondations massives entraînant des pertes humaines tragiques, des dommages matériels considérables et des communautés désemparées. Selon les rapports de Munich Re, un réassureur mondial, les pertes mondiales dues principalement aux catastrophes naturelles sont estimées à environ 3,139 milliards d'euros en 2021, 2,118 milliards d'euros en 2022 et 2,587 milliards d'euros en 2023 ([Munich Re, 2023](#)).

L'Agence européenne pour l'environnement (EEA) a souligné que l'augmentation des pertes en Europe ces dernières années est principalement attribuée à l'activité humaine dans les zones à risque ([EEA, 2017](#)). De plus, les projections indiquent que le changement climatique et les événements météorologiques extrêmes, tels que l'augmentation des températures, la variabilité des précipitations, la fonte des calottes glaciaires et l'élévation du niveau de la mer, pourraient s'intensifier de manière alarmante dans les années à venir ([Seneviratne et al., 2012](#)).

L'érosion hydrique désigne le processus par lequel l'eau enlève le sol et transporte les matériaux érodés loin de leur point d'origine. L'action de l'eau, notamment celle des pluies, provoque l'érosion du sol et engendre des phénomènes tels que l'érosion des ravins et des rigoles, entraînant des effets en aval comme les inondations et la sédimentation. La gravité de l'érosion hydrique est influencée par plusieurs facteurs, notamment la pente, le type de sol, la capacité de stockage en eau du sol, la nature de la roche sous-jacente, la couverture végétale, ainsi que l'intensité et la durée des précipitations ([Beroho et al., 2023](#) ; [Ouallali et al., 2024](#)).

INTRODUCTION GENERALE

L'érosion hydrique des sols constitue un problème majeur affectant la qualité de l'environnement dans de nombreuses régions du monde, notamment en Chine (Ye & Van Ranst, 2009), en Europe (Panagos & Katsoyiannis, 2019) et en Amérique du Nord (Baumhardt et al., 2015). L'Afrique subsaharienne est également sévèrement touchée par une érosion des sols préoccupante (Asenso-Okyere & Jemaneh, 2012). Environ 25 % des terres dégradées à l'échelle mondiale se trouvent en Afrique, où l'on estime que 65 % des terres agricoles sont affectées par la dégradation principalement due à l'érosion des sols (Tesfaye et al., 2014). Chaque année, environ 6,5 millions d'hectares de terres cultivées sont abandonnés à divers moments en raison de l'érosion sévère, ce qui peut avoir un impact significatif sur la productivité agricole et la sécurité alimentaire (Mekonnen & Tesfahunegn, 2011).

L'érosion des sols a été évaluée à l'aide de différentes techniques, qui varient selon les ressources disponibles, la couverture temporelle et spatiale, ainsi que les compétences techniques. L'érosion par déversement, qui se manifeste principalement sur les terres cultivées et peut atteindre une profondeur de 30 cm, peut être estimée par le biais d'enquêtes sur le terrain (Gessesse et al., 2015). Les érosions en creux, quant à elles, sont des signes visibles qui permettent aux agriculteurs de constater la perte de sols cultivés (Betela & Kebede, 2021). En outre, l'écoulement de l'eau dans les rigoles peut facilement transporter le sol détaché vers le bas de la pente, aggravant ainsi le problème de l'érosion.

L'érosion hydrique est principalement déclenchée par les précipitations. Le ruissellement et l'érosion des sols dépendent fortement des caractéristiques des précipitations, telles que la quantité, la durée, l'intensité, l'énergie cinétique et l'érosivité (El Brahimi et al., 2023 & 2024 ; Benzougagh et al., 2024). Des expériences de simulation de pluie sont couramment utilisées pour étudier l'impact de ces différentes caractéristiques sur le ruissellement et l'érosion des sols (Almeida et al., 2021). L'augmentation de la fréquence des pertes de sols résulte de l'intensification de la détérioration de l'environnement, de la croissance démographique et des changements climatiques (Bammou et al., 2023 & 2024).

Les glissements de terrain sont des mouvements gravitationnels de débris ou de masses rocheuses se déplaçant le long des pentes (Naceur et al., 2022 ; Youssef et al., 2023a). En général, ces événements incluent des coulées de boue, des débris et des roches, et peuvent être classés selon leur type de matériau, qui peut être constitué de sol, de débris ou de roches. Les mouvements associés aux glissements de terrain peuvent prendre différentes formes, telles que des avalanches, des glissements, des écoulements, des chutes, des basculements et des étalements (Oliveira et al., 2024).

Les glissements de terrain peuvent être déclenchés par divers phénomènes naturels, notamment des précipitations importantes et prolongées, l'activité sismique et la fonte des neiges. Ils peuvent également résulter d'activités anthropiques, telles que la construction de routes, d'infrastructures et la déforestation, ainsi que de l'interaction entre ces facteurs naturels et humains (Pourghasemi & Rahmati,

2018). Les conséquences des glissements de terrain incluent la dégradation des terres, qui modifie les paysages, entraîne l'érosion de la couche arable, et cause la destruction de logements et d'écosystèmes (Rahmati et al., 2020).

Au cours de la dernière décennie, l'urbanisation rapide, souvent sans recherche ni planification appropriée, a conduit à une augmentation de la fréquence des glissements de terrain (Li & Wang, 2019). Face à cette recrudescence, la communauté scientifique ainsi que les gestionnaires et planificateurs ont intensifié leurs efforts pour mieux comprendre les mécanismes des glissements de terrain et développer des approches d'évaluation pour une planification efficace et l'élaboration de mesures d'atténuation (Zhou et al., 2024 ; Choi et al., 2024).

Traditionnellement, les glissements de terrain étaient principalement considérés comme des processus naturels ; cependant, leur fréquence croissante ces dernières années a été en grande partie attribuée à des activités humaines (Wang et al., 2024 ; Youssef et al., 2023a).

Depuis des siècles, le bassin méditerranéen est reconnu comme une région particulièrement vulnérable aux phénomènes d'érosion hydrique et de mouvements de terrain, sous toutes leurs formes (Morgan, 2005). Occupant une position stratégique au sein de ce bassin, le Maroc, pays disposant de ressources en eau moyennes, présente une diversité géographique marquée. Son territoire s'ouvre en effet sur deux façades maritimes distinctes - la Méditerranée au nord et l'Atlantique à l'ouest - tandis que ses parties est et sud sont bordées par des environnements de type saharien. Cette hétérogénéité géographique entraîne des répercussions majeures sur les milieux naturels.

Le Maroc est un pays particulièrement exposé aux risques d'érosion et de glissements de terrain pour plusieurs raisons : (i) Relief accidenté : une grande partie du territoire marocain est caractérisée par un relief montagneux et escarpé, notamment dans les régions du Rif, du Moyen Atlas et de l'Anti-Atlas, près de 65% de sa superficie occupée par des zones montagneuses. Ces paysages accidentés sont propices aux phénomènes d'érosion hydrique et de mouvements de terrain. (ii) Climat méditerranéen et semi-aride : le Maroc connaît un climat méditerranéen avec des précipitations irrégulières et parfois violentes. Les fortes pluies conjuguées à des sols fragiles favorisent l'érosion des versants et le déclenchement de glissements de terrain. (iii) Déforestation et surexploitation des terres : la déforestation, le surpâturage et les pratiques agricoles intensives ont conduit à la dégradation du couvert végétal dans de nombreuses régions, rendant les sols plus vulnérables à l'érosion. (iv) Urbanisation non maîtrisée : le développement rapide et souvent anarchique de l'urbanisation, notamment sur les pentes, aggrave les risques d'instabilité des terrains et d'érosion. Cela contribue à des taux d'érosion parmi les plus élevés au monde, avec des pertes de sol estimées à 100 millions de tonnes par an. Ces conditions naturelles font du Maroc l'un des pays les plus touchés au monde par l'érosion hydrique.

INTRODUCTION GENERALE

L'érosion des sols est un phénomène préoccupant au Maroc, dont l'intensité varie grandement selon les régions géographiques. Dans la région du Rif, les taux d'érosion comptent parmi les plus élevés du pays, atteignant en moyenne 50 à 100 tonnes par hectare et par an (Roose, 1996 ; Laouina, 1998). Certaines zones particulièrement dégradées peuvent même subir une perte de sol de 200 tonnes/ha/an (Laouina, 2004 ; Benzougagh et al., 2020). Cette érosion hydrique intense est favorisée par la pluviométrie abondante et les pentes abruptes, combinées à la dégradation du couvert végétal par le surpâturage et la déforestation. Dans le Moyen Atlas, les taux d'érosion sont également importants, variant de 20 à 50 tonnes/ha/an (Sabir et al., 2004 ; Merdas et al., 2012). L'exploitation forestière intensive et les feux de forêt ont accéléré les phénomènes d'érosion dans cette région, avec des problèmes récurrents de glissements de terrain sur les versants abrupts. Le Haut Atlas connaît des taux d'érosion plus modérés, compris entre 10 et 30 tonnes/ha/an (El Garouani et al., 2008 ; Baba et al., 2016 ; Bammou et al., 2024). L'érosion hydrique et le ravinement restent néanmoins importants sur les terres de cultures en terrasses traditionnelles. Dans l'Anti-Atlas, les taux d'érosion sont relativement plus faibles, généralement inférieurs à 20 tonnes/ha/an (Chikhaoui et al., 2005 ; Bouhlassa & Aiachi, 2018). Cependant, l'érosion éolienne et les glissements de terrain sur les versants arides posent des problèmes localisés, notamment l'ensablement des oasis et des terres irriguées. Enfin, les plaines et plateaux du centre et du Sud du Maroc sont relativement moins touchés par l'érosion, avec des taux généralement inférieurs à 10 tonnes/ha/an. Néanmoins, des phénomènes érosifs plus localisés peuvent survenir à la suite d'orages violents, entraînant l'ensablement des terres agricoles en bordure du Sahara. À l'échelle nationale, les pertes de sol estimées s'élèvent à près de 100 millions de tonnes par an (Hammouda, 2010). Cette répartition met en évidence la grande variabilité spatiale des processus érosifs au Maroc, liée aux conditions géomorphologiques, climatiques et d'occupation des sols dans chaque région.

Notre zone d'étude, le bassin versant de l'oued Amtar, situé dans la chaîne montagneuse du Rif au nord du Maroc, fait face à des risques naturels majeurs, notamment en termes d'érosion hydrique et de mouvements de terrain. Plusieurs facteurs expliquent cette situation marquée : (i) Facteurs climatiques : précipitations abondantes et irrégulières, le bassin versant reçoit des pluies moyennes annuelles comprises entre 600 et 1000 mm, avec une forte variabilité saisonnière et interannuelle ; Occurrence d'épisodes pluviométriques intenses et orageux : ces événements violents favorisent le ruissellement et l'arrachage des sols par érosion hydrique et mouvement de terrain ; Alternance de périodes sèches et humides : ces contrastes climatiques fragilisent les sols et la végétation, les rendant plus sensibles à l'érosion et au glissement de terrain. (ii) Facteurs géomorphologiques : relief très accidenté avec des pentes fortes, le bassin versant est caractérisé par un relief très prononcé, avec des pentes généralement supérieures à 30%, voire atteignant 50% par endroits caractéristique de la chaîne rifaine, Nature géologique des formations, les terrains sont composés principalement de marnes, de

INTRODUCTION GENERALE

schistes et de flyschs, matériaux peu résistants à l'érosion et au mouvement de terrain , Absence de couverture végétale stabilisatrice, les versants dénudés sont très exposés aux processus d'érosion et de mouvements de terrain. (iii) Facteurs anthropiques : surexploitation des ressources naturelles, le surpâturage, la déforestation et les incendies ont largement dégradé le couvert végétal, fragilisant les sols ; Pratiques agricoles inadaptées, les techniques culturales inadéquates (labour dans le sens de la pente, absence de mesures antiérosives, etc.) accélèrent les processus d'érosion ; Développement anarchique des infrastructures, la construction de routes, d'habitations et d'autres aménagements sans mesures de protection adaptées contribue à déstabiliser les versants. (iv) Facteurs cumulatifs et interactions : l'interaction entre ces différents facteurs (climat, relief, géologie, géomorphologie, anthropisation) crée un cercle vicieux de dégradation des terres et d'aggravation des risques naturels ; Les processus d'érosion hydrique (ravinement, le sapement des berges, le transport solide important dans les cours d'eau, glissements, laves torrentielles) se renforcent mutuellement et entraînent une perte de fertilité des sols et une sédimentation accrue dans le réseau hydrographique, la perturbation du régime hydrologique et des dommages aux infrastructures; Les mouvements de terrain (glissements, coulées boueuses) sont favorisés par l'érosion hydrique et la dégradation de la couverture végétale.

Cette analyse multifactorielle met en évidence la complexité des processus à l'origine des problématiques d'érosion et de mouvements de terrain dans le bassin versant de l'oued Amtar. Une approche intégrée, combinant des mesures de gestion durable des ressources naturelles et de protection des écosystèmes, est nécessaire pour atténuer ces risques naturels majeurs.

Face à cette situation, le Maroc a développé une expertise considérable en matière d'évaluation et de cartographie du risque d'érosion hydrique à l'échelle nationale et régionale. Plusieurs approches complémentaires sont mises en œuvre, combinant des données géographiques détaillées et des modèles de prédiction de l'érosion. La méthode la plus couramment utilisée est l'équation universelle des pertes en sol (USLE), qui intègre des paramètres clés comme la topographie, les caractéristiques des sols, les pratiques de gestion des terres et les conditions climatiques. Des variantes plus complexes de ce modèle, comme RUSLE et MUSLE, permettent d'affiner les estimations en tenant compte de la dynamique temporelle des processus érosifs. Des techniques de télédétection par satellite et de systèmes d'information géographique (SIG) sont également mises à profit pour cartographier la susceptibilité à l'érosion des différentes unités de paysage. Certaines études combinent même plusieurs méthodes, comme l'USLE couplée à des analyses multicritères ou à des modèles d'intelligence artificielle, afin d'obtenir une évaluation plus robuste et précise du risque érosif.

Les objectifs et des méthodes utilisées dans cette étude sur l'évaluation du risque d'érosion et de glissements de terrain dans le bassin versant de l'oued Amtar sont : (i) identifier et cartographier les zones à risque d'érosion hydrique à l'aide d'analyses morphométriques. (ii) quantifier les taux de perte

INTRODUCTION GENERALE

en sol à l'échelle du bassin versant à l'aide des modèles EPM (Erosion Potential Method) et RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation). (iii) prédire les zones susceptibles aux glissements de terrain en utilisant trois modèles : Logistic Regression (RL), Random Forest (RF) et Support Vector Machine (SVM).

Cette approche multiméthode vise à fournir une évaluation et une cartographie précises des risques d'érosion hydrique et de glissements de terrain à l'échelle du bassin versant de l'oued Amtar. Face à ces défis, des efforts sont nécessaires en matière de gestion intégrée des bassins versants, d'adoption de pratiques agricoles et forestières durables, et de mise en œuvre de mesures de conservation des sols et des eaux. C'est un enjeu complexe qui nécessite l'implication de tous les acteurs, des décideurs politiques aux communautés locales.

Les résultats (cartes des zones à risques) représentent des outils cruciaux (feuille de route) pour orienter les interventions de lutte contre l'érosion et glissement des sols et de gestion durable des terres dans la région. Ces résultats cartographiques fourniront un support décisionnel solide pour la mise en place des plans d'action et des stratégies visant à préserver durablement les ressources naturelles et à prévenir les risques naturels auxquels le territoire est exposé.

CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART SUR L'ALEA, FACTEURS DECLENCHEURS ET CONSEQUENCES SUR LA STABILITE DES SOLS

Résumé du chapitre I

Ce chapitre présente une analyse approfondie des processus naturels et anthropiques responsables de la déstabilisation des sols dans des régions à risque, avec un focus particulier sur le Rif au Maroc.

Le Rif, une région montagneuse caractérisée par des pentes abruptes et des sols fragiles, est particulièrement vulnérable aux phénomènes d'érosion et aux mouvements de terrain. Cette vulnérabilité est aggravée par une géologie complexe composée de schistes, marnes, calcaires et flyschs, des types de sols qui se dégradent rapidement sous l'effet des précipitations torrentielles fréquentes dans cette région au climat méditerranéen. L'étude montre que ces conditions géologiques et climatiques combinées, ainsi que la topographie accentuée, exacerbent l'érosion hydrique, qui se manifeste par l'apparition de rigoles, ravines, et glissements de terrain massifs.

Ce chapitre identifie plusieurs déclencheurs majeurs, tels que les fortes précipitations méditerranéennes, la déforestation, les pratiques agricoles non durables et l'urbanisation non planifiée, qui affaiblissent la stabilité des sols. Les conséquences environnementales et socio-économiques de ces phénomènes sont également mises en lumière : dégradation des terres agricoles, destruction d'infrastructures, perte de vies humaines et perturbation des écosystèmes.

En conclusion, ce chapitre met en évidence la nécessité de renforcer la résilience des régions vulnérables par des politiques de gestion adaptées, fondées sur l'analyse géospatiale et la modélisation des risques. Il suggère que des outils modernes, comme la télédétection spatiale et les systèmes d'information géographique (SIG), combinés avec des modèles de prédiction basés sur la machine Learning, offrent des moyens puissants pour anticiper les zones à risque et élaborer des solutions efficaces pour minimiser les impacts de l'érosion hydrique et des mouvements de terrain sur les écosystèmes et les populations locale

I.1. Problématique et objectifs de la thèse

Le territoire Marocain est vulnérable aux aléas climatiques, météorologiques, géologiques ou biologiques. Des risques importants sont engendrés par ces phénomènes : l'érosion du sol, les mouvements de terrain, les inondations, les incendies de forêts, les crues torrentielles, les séismes. Ces phénomènes naturels entraînent des dommages considérables, voire mettent en péril le développement socio-économique des régions qui sont vulnérables aux catastrophes naturelles (pays méditerranéens). L'objectif de cette étude est d'examiner les risques d'érosion de surface et profonde, qui entraînent des dommages considérables aux infrastructures qui sont considérées comme des risques majeurs. C'est un désordre qui pose de nombreux défis économiques et écologiques.

L'érosion hydrique et les mouvements de terrain sont des phénomènes naturels qui affectent particulièrement les régions montagneuses à travers le monde, et plus spécifiquement au Maroc. La région du Rif, située au nord du pays, est l'une des zones les plus vulnérables à ces risques en raison de sa géomorphologie, de sa structure géologique fragile et des pressions anthropiques intenses (Kirat,1993). Le Rif, constitué de montagnes aux pentes abruptes, de sols souvent instables et soumis à un climat méditerranéen marqué par des précipitations intenses, est régulièrement affecté par des processus érosifs importants ainsi que par des mouvements de terrain destructeurs. Ces phénomènes, en plus de causer des dégradations environnementales, entraînent des répercussions socio-économiques majeures, notamment sur les communautés rurales, les infrastructures et l'agriculture locale (Églantine, 2019).

Le Maroc, comme d'autres pays du pourtour méditerranéen, fait face à des défis environnementaux croissants en matière de gestion des terres, en raison de l'interaction de plusieurs facteurs : l'intensification des activités humaines, les changements climatiques, et la nature même des écosystèmes locaux, souvent fragiles et vulnérables. Le Rif, en tant que région montagneuse densément peuplée, se trouve au cœur de cette problématique. L'analyse géospatiale et la modélisation des risques d'érosion et de mouvements de terrain deviennent des outils incontournables pour comprendre les dynamiques en jeu et proposer des solutions durables pour la gestion des risques.

I.1.1. Géomorphologie et vulnérabilité du Rif, risques d'érosion de surface et profonde

Le Rif est une chaîne montagneuse qui s'étend sur environ 300 kilomètres le long de la côte méditerranéenne. Sa géologie complexe, formée principalement de schistes, de marnes, de calcaires et de flyschs, rend les sols particulièrement sensibles aux phénomènes d'érosion et MT. La topographie du Rif, avec ses pentes abruptes, aggrave la déstabilisation des sols sous l'effet de la gravité et des précipitations. Ces facteurs naturels créent une vulnérabilité intrinsèque aux processus d'érosion hydrique et MT, d'autant plus que la région connaît de fortes variations climatiques. En effet, les

précipitations, souvent torrentielles pendant les mois d'hiver, provoquent un ruissellement intense sur des sols fragilisés, contribuant à des dégradations rapides des versants montagneux.

Dans ce contexte géologique et topographique, l'érosion hydrique se manifeste de manière variée, allant de l'érosion superficielle **de surface** (formation de rigoles, ravines) à des glissements massifs de terrains qui peuvent entraîner des débris et des roches sur plusieurs dizaines de mètres, **profonde**. Ces mouvements de terrain mettent non seulement en péril la stabilité des sols, mais aussi la sécurité des populations locales, ainsi que la durabilité des infrastructures construites, souvent sans mesures adéquates de protection contre ces phénomènes.

I.1.2. Facteurs aggravants

Plusieurs facteurs amplifient l'intensité et la fréquence des phénomènes d'érosion hydrique et des mouvements de terrain dans le Rif, qu'ils soient d'origine naturelle ou anthropique.

I.1.2.1. Le climat méditerranéen et les précipitations intenses

Le climat du Rif est de type méditerranéen, caractérisé par des étés chauds et secs et des hivers doux et pluvieux. Toutefois, ce climat se distingue par des épisodes de pluies intenses et soudaines, qui provoquent des inondations et un ruissellement important. Ce ruissellement, accentué par l'absence de couverture végétale dense dans certaines zones, déstabilise les sols et déclenche des glissements de terrain. Le manque de rétention d'eau dans les sols, souvent saturés rapidement, est un autre facteur contribuant à ces phénomènes.

I.1.2.2. La déforestation et la dégradation de la couverture végétale

La déforestation, qu'elle soit due à l'exploitation du bois, au surpâturage ou à la mise en culture de terres sur des pentes, est l'un des principaux facteurs qui amplifie l'érosion des sols. La couverture végétale joue un rôle crucial dans la stabilisation des sols, car elle réduit l'impact des gouttes de pluie sur le sol et régule l'écoulement de l'eau de surface. Dans le Rif, la dégradation progressive des forêts, notamment à cause de l'agriculture de subsistance et des pratiques pastorales, a conduit à une augmentation significative de l'érosion. Les sols, dépourvus de leur protection naturelle, deviennent alors extrêmement vulnérables aux intempéries, ce qui accélère leur détérioration.

I.1.2.3. Les pratiques agricoles non durables

Les méthodes agricoles traditionnelles dans le Rif, telles que le labour en ligne de pente et la culture de céréales, accentuent également l'érosion. En l'absence de techniques de conservation des sols, comme la construction de terrasses ou l'adoption de l'agroforesterie, les sols sont exposés aux écoulements d'eau non contrôlés. La perte de matière organique et la formation de rigoles et de ravines sont des signes évidents de la détérioration progressive des terres arables, qui devient un problème critique dans cette région où l'agriculture est la principale source de subsistance.

I.1.2.4. L'urbanisation et l'aménagement non planifiés

Les processus d'urbanisation rapide dans certaines parties du Rif, notamment autour des zones urbaines émergentes comme Chefchaouen, ont amplifié les risques de glissements de terrain. La construction d'infrastructures, souvent sur des pentes instables et sans études géotechniques préalables, contribue à la dégradation des sols. L'aménagement non contrôlé des zones à risque, combiné à l'absence de mesures d'atténuation (comme les systèmes de drainage ou les murs de soutènement), augmente la vulnérabilité des populations et des infrastructures locales.

I.1.3. Conséquences environnementales, économiques et sociales

L'érosion hydrique et les glissements de terrain ont des impacts considérables sur le développement socio-économique des régions touchées au Maroc :

- **Dégradation des terres agricoles** : La perte de la couche arable diminue la fertilité des sols, réduisant ainsi les rendements agricoles et menaçant la sécurité alimentaire des populations rurales. Cette perte de productivité entraîne des conséquences directes sur les revenus des agriculteurs, notamment dans des zones comme le Rif, où l'agriculture de subsistance est dominante (*Figure 6*).
- **Destruction des infrastructures** : Les glissements de terrain endommagent régulièrement les infrastructures, notamment les routes, les ponts et les habitations, augmentant les coûts de réparation et de reconstruction. Les régions montagneuses connaissent fréquemment des coupures de routes à la suite de ces événements, isolant temporairement les villages et retardant les secours en cas d'urgence (*Figure 4*).
- **Risques pour la sécurité des populations** : Les glissements de terrain peuvent entraîner des pertes humaines, surtout dans les zones rurales où les habitations sont construites sur des terrains instables (*Figure 5*). En l'absence de dispositifs d'alerte précoce, les populations sont souvent prises au dépourvu, ce qui accroît la mortalité liée à ces événements (*Figure 1*).
- **Perturbation des écosystèmes** : L'érosion hydrique entraîne un appauvrissement de la biodiversité, notamment par l'élimination de la végétation qui stabilise les sols et maintient l'équilibre des écosystèmes. Les rivières et cours d'eau se chargent de sédiments, ce qui altère la qualité de l'eau et menace la faune aquatique (*Figure 2*).

Voici quelques exemples des conséquences socio-économique dans notre secteur d'étude.



Figure 1 : Construction en amont du talus.



Figure 2 : Erosion en nappe (photo d'oued Amtar du jeudi 9 mars 2023)

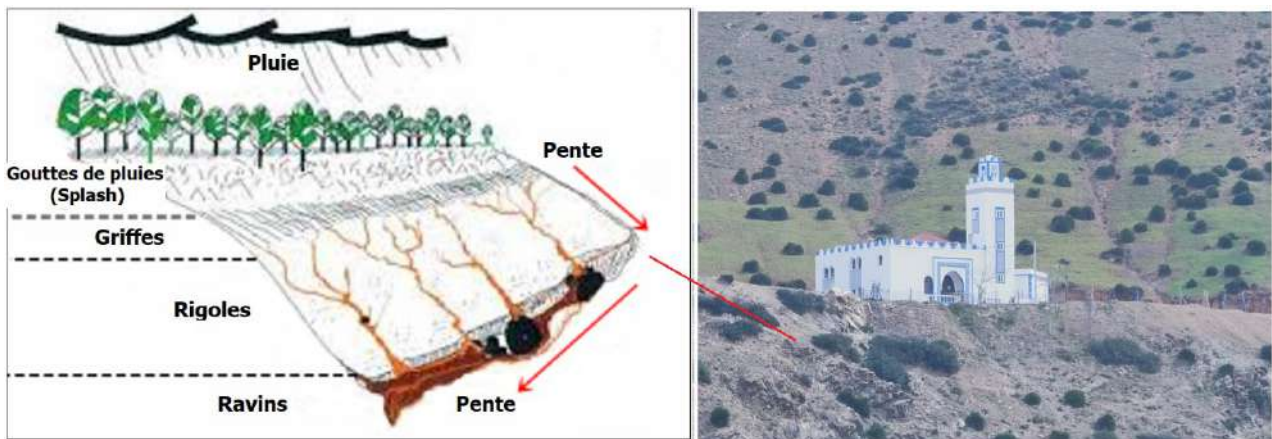


Figure 3 : Processus d'érosion linéaire, en griffes ou en rigoles (BV d'oued Amtar)



Figure 4 : Dégradation des routes à cause des instabilités de terrain



Figure 5 : des maisons s'effondrent à cause de l'érosion hydrique des sols et des glissements de terrain



Figure 6 : Dégradation des terrains agricole à cause des instabilités de terrain

I.1.4. Besoin urgent d'une approche intégrée et durable

Face à ces enjeux, il est impératif de développer une approche intégrée pour la gestion des risques d'érosion hydrique et de glissements de terrain. Cela passe par la mise en place de stratégies de conservation des sols et des eaux, l'introduction de pratiques agricoles durables, et la reforestation des zones dégradées. En outre, il est crucial de renforcer la planification territoriale en prenant en compte les risques naturels dans les politiques d'aménagement, afin de minimiser l'exposition des populations et des infrastructures aux dangers naturels. La recherche scientifique, notamment à travers l'utilisation de la télédétection spatiale, des systèmes d'information géographique (SIG) et des modèles prédictifs de machine Learning, joue un rôle central dans la compréhension des dynamiques spatiales de ces phénomènes et dans l'anticipation des zones à risque.

I.2. Organisation de la thèse

La présente thèse est constituée de six chapitres.

- Le premier chapitre détaille l'état de l'art concernant l'érosion hydrique et les mouvements de terrain, problématique et l'organisation de la thèse, conception de base ainsi que les méthodes d'études appliquées.
- Le second chapitre concerne la présentation des caractéristiques naturelles (situation géographique, morphologie, climat, géologie, pédologie, couvert végétal et facteur anthropique), du cadre administratif (situation administrative, etc.) et humains (démographie, vulnérabilité de la population, indice de pauvreté).
- Le troisième chapitre illustre le travail réalisé pour la hiérarchisation et la priorisation des zones à risques dans le bassin versant de l'oued Amtar, par l'approche de l'analyse morphométrique.

- Le quatrième chapitre constitue une analyse cartographique qualitatif et quantitatif de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'oued Amtar par le modèle d'érosion potentielle (EPM).
- Le cinquième chapitre présente la cartographie et la quantification des pertes en sol par l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'oued Amtar en utilisant le modèle révisé de l'équation universelle des pertes en sol (RUSLE) qui est un modèle mathématique.
- Le sixième chapitre présente la partie qui a été consacrée à l'évaluation de la susceptibilité aux mouvements de terrain par des trois différents modèles de machine Learning : Logistic Regression (LR), Random Forest (RF) et Support Vector Machine Classifier (SVM).
- Enfin, une conclusion générale résume l'essentiel des chapitres précédents et propose des recommandations à prendre en considération dans les futurs travaux.

I.3. Concepts de base

I.3.1. Recherche associée

Étant donné que les risques naturels sont récurrents, leur évaluation et leur appréciation deviennent essentielles pour développer des mesures d'atténuation et de gestion efficaces. Les avancées technologiques récentes ont considérablement amélioré la préparation et la réponse face aux risques naturels imminents. Parmi ces avancées, les technologies des systèmes d'information géographique (SIG) et de la télédétection spatiale jouent un rôle crucial dans l'évaluation de divers risques tels que les tremblements de terre, les inondations, les incendies de forêt, les glissements de terrain et les sécheresses (Ghorbanzadeh et al., 2018). Différentes approches permettent d'extraire des informations à partir d'images satellite en utilisant le SIG et la télédétection spatiale (El Brahimi et al., 2024).

Les évaluations des risques naturels ont été réalisées à l'aide de diverses approches, telles que le rapport de fréquence (FR) (Choi et al., 2012; Youssef et al., 2023a), le processus hiérarchique analytique (AHP) (Althuwaynee et al., 2014; Hamdouni et al., 2022; Bammou et al., 2023), les machines à vecteurs de support (SVM) (He et al., 2019 ; Benzougagh et al., 2023 ; 2024), les forêts aléatoires (Chen et al., 2017), les K-voisins les plus proches (KNN) (Bammou et al., 2024), les arbres de décision (Fang et al., 2021; Mia et al., 2023), la régression logistique (Chen et al., 2016; Ighile et al., 2022), les réseaux neuronaux artificiels (Y. Wang et al., 2019) et les réseaux neuronaux convolutifs (CNN) (Z. Zhao et al., 2024).

Récemment, les méthodologies et les avancées en apprentissage automatique (ML) ont été largement adoptées pour l'évaluation des risques naturels, tels que les tremblements de terre, les inondations, les incendies de forêt et les glissements de terrain (Eloudi et al., 2023 ; Bammou et al., 2024). Chaque méthodologie de ML présente des avantages et des inconvénients spécifiques, ainsi qu'un

potentiel unique. Toutefois, les performances de chaque modèle varient en fonction des informations d'entrée utilisées, de la structure du modèle pour l'analyse et de la précision du modèle choisi.

Actuellement, il n'existe pas de recommandation claire pour déterminer quel modèle est le plus adapté à une analyse, une application ou une région donnée (Bammou et al., 2024). Parmi les algorithmes d'apprentissage automatique, des techniques telles que la forêt aléatoire (RF), la machine à vecteurs de support (SVM), les K-voisins les plus proches (KNN), le boosting de gradient extrême (XGBoost), les réseaux neuronaux artificiels (ANN), les arbres de décision (DT) et la régression logistique (LR) ont été comparées en termes de précision (Bammou et al., 2024).

I.3.2. Questions de recherche

La question de recherche de cette thèse se concentre sur la cartographie et l'évaluation du risque d'érosion hydrique et des mouvements de terrain dans le bassin versant de l'oued Amtar, une région montagneuse du Rif au Maroc, particulièrement vulnérable aux phénomènes d'érosion en raison de ses caractéristiques géologiques et climatiques. Pour mener à bien cette étude, nous adoptons une approche méthodologique intégrée qui combine des techniques d'analyse morphométrique. Ces techniques nous permettent d'explorer les relations entre la topographie, le drainage et d'autres paramètres géomorphologiques, afin d'identifier les zones les plus susceptibles d'être affectées par l'érosion.

Nous utilisons également des modèles éprouvés tels que l'Erosion Potential Model (EPM) et la Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), qui offrent des outils robustes pour quantifier les pertes de sol en tenant compte des facteurs clés tels que la couverture végétale, les types de sol, l'intensité des précipitations et l'utilisation des terres. Ces modèles nous permettront de générer des cartes de risque d'érosion hydrique, fournissant ainsi une évaluation quantitative des zones à risque.

Pour appuyer ces analyses traditionnelles, nous intégrons des modèles de machine Learning avancés, notamment Random Forest (RF), Support Vector Machine (SVM) et Logistic Regression (RL). Ces techniques permettent de traiter efficacement des ensembles de données complexes et hétérogènes, tout en identifiant des relations non linéaires entre les différents facteurs influençant les mouvements de terrain. En utilisant des ensembles de données d'entraînement et de validation, nous serons en mesure de développer des modèles prédictifs robustes qui cartographient le risque de mouvements de terrain avec une précision accrue.

L'objectif ultime de cette recherche est de fournir des outils et des recommandations concrètes pour la gestion durable des ressources naturelles dans le bassin versant de l'oued Amtar. En améliorant notre compréhension des dynamiques d'érosion et en prédisant les mouvements de terrain, cette étude vise à renforcer la résilience des écosystèmes et des communautés locales face aux risques environnementaux. Les résultats de cette recherche devraient également contribuer à l'élaboration de

politiques de gestion des terres plus efficaces, adaptées aux spécificités géographiques et climatiques de la région.

I.3.3. Données utilisées

Le choix, la nature et la fiabilité des données constituent une étape essentielle dans toute évaluation, et plus particulièrement dans l'évaluation des risques naturels. L'inventaire des mouvements de terrain, de l'érosion hydrique par ravinement et des inondations est crucial pour l'élaboration des cartes de susceptibilité. Il est donc primordial de disposer d'ensembles de données appropriés et adaptés à ces évaluations.

Les enquêtes de terrain, les missions sur le terrain, ainsi que le traitement des images des satellites Sentinel-1, Sentinel-2 et Landsat, ont permis de créer une base de données robuste couvrant l'ensemble du bassin versant d'oued Amtar. Un Modèle Numérique d'Élévation (MNE) a été obtenu gratuitement, avec une résolution spatiale de 30 m, via le portail des données du United States Geological Survey (USGS) EarthExplorer. De plus, une résolution de 12,5 m est disponible pour certaines zones d'étude sur le portail Data Search Vertex ASF. Ces deux types de MNE ont servi à développer divers facteurs de conditionnement topographique auxiliaires, tels que la courbure, la pente, l'aspect, l'indice de puissance du cours d'eau (SPI), l'indice de rugosité du terrain (TRI), et l'indice d'humidité topographique (TWI). Des facteurs géomorphologiques, tels que les caractéristiques géomorphologiques et la profondeur des vallées, ont également été pris en compte.

Les facteurs géologiques, comme le facteur K et le type de sol, ont été extraits des données open source fournies par le portail de la FAO sur les sols, en particulier la base de données mondiale harmonisée sur les sols (FAO Soils Portal). Les informations sur la lithologie et les failles ont été développées à partir de cartes géologiques à des échelles de 100 000 et 500 000. Le facteur hydrologique de sol (HSG) a été établi en utilisant les données d'EARTH-DATA. Les données de précipitations ont été obtenues auprès de l'Agence du Bassin Hydraulique du Loukkos (ABHL).

De plus, l'Indice de Végétation par Différence Normalisée (NDVI) et les informations sur la couverture terrestre ont été dérivés du traitement des images satellites de Sentinel-2. Le réseau de transport et routier a été extrait de la base de données OpenStreetMap OSM.

L'établissement des inventaires concernant les mouvements de terrain, l'érosion hydrique par ravinement et les inondations dans le bassin versant d'oued Amtar repose sur une combinaison d'enquêtes de terrain, de relevés GPS, et de données nationales et régionales provenant de diverses sources, notamment l'ABHL. L'analyse des images de Google Earth Pro des zones vulnérables, les résultats de ces études, en particulier dans les zones montagneuses, ont permis d'identifier des centaines de sites où se sont produits des ravinements, des glissements de terrain et des inondations.

I.4. Modèles et des méthodes utilisées

Ce chapitre présente une synthèse des modèles et des méthodes utilisés pour atteindre les objectifs et répondre aux questions de recherche de cette thèse. Les méthodes ont été soigneusement sélectionnées en fonction de leur pertinence et de leur applicabilité à la problématique étudiée. Chaque technique décrite a été choisie pour son adéquation à l'évaluation des risques naturels, en portant une attention particulière à la cartographie de la susceptibilité, à la quantification des pertes de sol et à la prédiction des risques liés au changement climatique.

Une explication complète des méthodes, comprenant les équations, la zone d'étude, les inventaires et les ensembles de données, est fournie dans les articles publiés dans le cadre de cette thèse, lesquels sont intégrés dans le manuscrit actuel.

I.4.1. Analyse morphométrique

L'érosion hydrique représente l'un des principaux défis environnementaux auxquels sont confrontés de nombreux bassins versants à travers le monde. Elle entraîne non seulement la dégradation des sols, mais aussi des impacts significatifs sur la qualité de l'eau, la biodiversité et les infrastructures humaines. Dans ce contexte, la priorisation des zones à risque est essentielle pour une gestion efficace des ressources naturelles et la mise en œuvre de stratégies de conservation. L'analyse morphométrique se présente comme une méthode précieuse pour identifier et évaluer ces zones vulnérables.

L'analyse morphométrique repose sur l'étude des formes et des caractéristiques géométriques du relief terrestre. En examinant des paramètres tels que la pente, le drainage, la longueur des rivières et la densité de drainage, cette méthode permet de quantifier les facteurs qui influencent l'érosion. Les zones à forte pente, par exemple, sont souvent plus susceptibles d'être érodées en raison de la gravité et de l'écoulement des eaux de pluie. De même, une densité de drainage élevée peut indiquer une vulnérabilité accrue, car elle favorise le ruissellement et l'érosion des sols.

L'utilisation d'outils géomatiques et d'analyses géospatiales a considérablement enrichi les capacités d'analyse morphométrique. Les systèmes d'information géographique (SIG) et la modélisation numérique du terrain permettent de cartographier les caractéristiques morphométriques avec une précision accrue, facilitant ainsi l'identification des zones à risque. En intégrant ces données morphométriques dans des modèles d'évaluation des risques, il est possible de produire des cartes de vulnérabilité qui guident les décideurs dans le développement de politiques de gestion durable.

L'approche d'analyse morphométrique comprend plusieurs étapes clés qui permettent de prioriser les zones à risque d'érosion dans un bassin versant. Tout d'abord, la méthodologie débute par la collecte de données. Un Modèle Numérique de Terrain (MNT) avec une résolution de 30 m × 30 m est utilisé

pour la délimitation et la caractérisation des bassins versants. Parallèlement, une vérification des données est réalisée en consultant la littérature existante et en validant les informations.

Ensuite, la délimitation des bassins versants est effectuée. Les canaux de drainage sont définis comme des cellules DEM ayant une surface contributive d'au moins 500 hectares, ce qui permet de délimiter 20 sous-bassins.

L'étape suivante concerne l'analyse morphométrique, où divers paramètres sont calculés. Les paramètres morphométriques linéaires, tels que le nombre de flux, l'ordre des flux, la longueur totale des flux, la densité de drainage et la fréquence des flux, sont évalués. En parallèle, des paramètres de forme comme le facteur de forme, le ratio circulaire, le ratio d'élongation et le coefficient de compacité sont également analysés.

La priorisation des sous-bassins suit cette analyse. Chaque paramètre linéaire reçoit un rang basé sur sa valeur, avec les valeurs les plus élevées ayant le rang le plus élevé. Pour les paramètres de forme, c'est l'inverse qui est appliqué. Ensuite, un paramètre composite (C_p) est calculé en faisant la somme des valeurs des paramètres linéaires et de forme, puis en divisant par le nombre de paramètres, ce qui permet de déterminer la priorité des sous-bassins. Les sous-bassins sont ensuite classifiés en trois catégories de priorité selon leur C_p : haute priorité pour ceux les plus vulnérables à l'érosion, priorité moyenne pour ceux avec une susceptibilité modérée, et basse priorité pour ceux ayant une faible susceptibilité.

Finalement, les résultats de l'analyse sont interprétés pour évaluer les risques d'érosion. Cela permet d'identifier les zones critiques nécessitant des mesures de conservation des sols. Des recommandations spécifiques sont formulées pour les interventions à mettre en œuvre dans les sous-bassins classés en haute priorité, afin de minimiser l'érosion des sols.

Ainsi, cette méthodologie d'analyse morphométrique offre une approche systématique et quantitative pour la gestion des risques d'érosion dans un bassin versant, facilitant la planification de mesures de conservation adéquates.

L'analyse morphométrique constitue une approche essentielle pour la priorisation des zones à risque d'érosion hydrique dans un bassin versant. Elle offre une compréhension approfondie des dynamiques de terrain et des processus d'érosion, tout en fournissant des outils pratiques pour une gestion proactive des ressources en sol et en eau. Dans cette étude, nous explorerons les différentes techniques d'analyse morphométrique et leur application dans le contexte de la gestion des risques d'érosion hydrique, en mettant l'accent sur leur pertinence pour des stratégies de conservation efficaces et durables.

I.4.2. Modèle d'érosion potentielle (EPM)

L'érosion hydrique constitue un phénomène préoccupant qui impacte gravement les écosystèmes, les ressources en sols et en eau, ainsi que les infrastructures humaines. Dans ce contexte, la quantification du risque d'érosion est essentielle pour la mise en place de stratégies de gestion durable des bassins versants. Le Modèle d'Érosion Potentielle (EPM) s'impose comme un outil fondamental pour évaluer ce risque, en intégrant divers facteurs environnementaux et anthropiques (Figure 8).

L'EPM repose sur l'interaction de plusieurs éléments clés, notamment la topographie, le type de sol, l'occupation du sol et les conditions climatiques. Il permet de simuler les processus d'érosion en tenant compte des variations spatio-temporelles des facteurs qui influencent le ruissellement et la dégradation des sols. En quantifiant l'érosion potentielle, ce modèle offre une évaluation quantitative des zones les plus vulnérables, facilitant ainsi la priorisation des interventions de conservation.

L'un des avantages majeurs de l'EPM est sa capacité à intégrer des données géospatiales grâce à des outils comme les Systèmes d'Information Géographique (SIG), permettant une analyse précise des dynamiques d'érosion à l'échelle du bassin versant. En combinant des paramètres morphométriques, des indices de couverture végétale et des données météorologiques, l'EPM peut fournir des estimations fiables des taux d'érosion potentiels pour différentes zones du bassin.

De plus, l'EPM joue un rôle crucial dans l'élaboration de scénarios de gestion. En simulant l'impact de différentes pratiques de gestion des terres, telles que l'agroforesterie, ou la gestion des cultures, il permet d'évaluer leur efficacité dans la réduction de l'érosion. Ainsi, ce modèle devient un outil précieux pour les décideurs, qui peuvent s'appuyer sur ses résultats pour développer des stratégies adaptées aux réalités locales.

Le Modèle d'Érosion Potentielle (EPM) pour la quantification du risque d'érosion hydrique dans un bassin versant suit une méthodologie structurée en plusieurs étapes essentielles, à commencer par : **(i)** la collecte de données provenant de différentes sources.

Tout d'abord, des données de précipitations et de température sont recueillies, car elles jouent un rôle crucial dans l'analyse des conditions climatiques qui influencent l'érosion. Des informations sur la lithologie, c'est-à-dire la composition géologique du terrain, sont également intégrées, car elles affectent la susceptibilité du sol à l'érosion. Par ailleurs, un Modèle Numérique d'Élévation (MNE) est utilisé pour fournir des données topographiques nécessaires à l'analyse. Enfin, des images satellites, notamment celles du satellite Landsat 8, sont employées pour observer les changements de couverture terrestre et d'érosion à grande échelle.

Une fois ces données collectées, elles sont soumises à **(ii)** un traitement. Cela inclut la correction des images satellitaires (correction atmosphériques et radiométrique) pour garantir leur précision, ainsi que l'utilisation de l'Inverse Distance Weighting (IDW) pour interpoler les valeurs manquantes dans les

ensembles de données de précipitations et de température. Les informations issues de la lithologie et du MNE sont ensuite analysées pour évaluer leur impact sur l'érosion.

Après le traitement des données, plusieurs facteurs d'érosion sont calculés (iii). Le facteur H est déterminé en fonction de la hauteur ou du volume d'eau, tandis que le facteur T est lié aux types de sol et à leur comportement face à l'érosion. Le facteur Y évalue l'influence de la couverture du sol, alors que le facteur q prend en compte le flux de surface et les conditions environnementales locales. L'intégration de ces facteurs se traduit par des équations spécifiques, où ZZ est calculé selon la formule :

$$Z=Y \times Xa \times (\phi + a)$$

et le résultat final W, est obtenu avec l'équation suivante :

$$W=H \times T \times \pi \times Z3w=H \times T \times \pi \times Z3.$$

En conclusion, ce processus aboutit à la création d'une carte d'évaluation de l'érosion de l'eau, fournissant une analyse détaillée des zones susceptibles à l'érosion. Cette carte constitue un outil précieux pour la planification environnementale et la gestion des ressources naturelles, permettant d'identifier les régions à risque et d'élaborer des stratégies de prévention adaptées.

1.4.3. Équation universelle révisée de perte de sol (RUSLE)

Dans ce cadre de la gestion du risque d'érosion hydrique, l'Équation Universelle Révisée de Perte de Sol (RUSLE) émerge comme un outil fondamental pour la quantification du risque d'érosion dans les bassins versants. Développée pour intégrer divers facteurs influençant l'érosion, la RUSLE offre une approche systématique permettant d'évaluer les pertes de sol potentielles dues à l'érosion par ruissellement.

La RUSLE repose sur une équation (Eq.1) qui combine plusieurs paramètres clés : l'intensité et la fréquence des précipitations, la résistance du sol à l'érosion, le type de couverture végétale, les pratiques de gestion des terres et la topographie du terrain. En quantifiant chacun de ces facteurs, la RUSLE permet d'obtenir une estimation précise des taux d'érosion, facilitant ainsi l'identification des zones les plus vulnérables au sein d'un bassin versant (Figure 9).

$$A = R * K * LS * C * P \quad (\text{Eq.1})$$

Avec :

A : Taux annuel de perte en sol en t/ha/an.

R : Indice d'érosivité potentielle de la précipitation (MJ mm ha⁻¹ h⁻¹).

K : Indice d'érodabilité des sols à l'érosion hydrique).

LS : Facteur topographique dépendant de la pente et sa longueur.

C : Facteur de couverture végétale, et les pratiques culturales.

P : Facteur des pratiques culturales antiérosives et de conservation et d'aménagement.

L'un des avantages majeurs de la RUSLE réside dans sa flexibilité et son adaptabilité à différents contextes géographiques et climatiques. Que ce soit dans des régions agricoles, forestières ou urbaines, l'application de la RUSLE permet d'évaluer les impacts des pratiques de gestion des terres sur l'érosion et de concevoir des stratégies de conservation adaptées. En intégrant des données géospatiales à l'aide de Systèmes d'Information Géographique (SIG), il est possible de visualiser et d'analyser les dynamiques d'érosion à une échelle spatiale pertinente.

De plus, la RUSLE joue un rôle crucial dans la planification des interventions de gestion des ressources en eau et en sol. En simulant les effets potentiels de différentes pratiques de gestion, telles que l'agriculture de conservation, la reforestation ou l'aménagement du paysage, elle permet aux décideurs d'évaluer l'efficacité de ces mesures dans la réduction de l'érosion. Cela contribue non seulement à la protection des sols, mais également à la préservation des écosystèmes environnants et à la durabilité des activités agricoles.

I.4.4. Modèles d'apprentissage automatique (ML)

Les mouvements de terrain, en particulier les glissements de terrain, représentent un risque majeur pour la sécurité humaine, l'infrastructure et l'environnement dans de nombreuses régions du monde. Leur prévision et leur gestion efficace nécessitent une compréhension approfondie des facteurs déclenchants et des conditions environnementales. Dans ce contexte, les modèles d'apprentissage automatique (Machine Learning, ML) émergent comme des outils puissants pour analyser et prédire le risque de glissements de terrain dans les bassins versants, en tirant parti de grandes quantités de données multidimensionnelles (Figure 10).

Ces dernières années, les méthodologies d'intelligence artificielle (IA) et d'apprentissage automatique (ML) ont gagné en popularité, contribuant au développement de techniques de prédiction offrant des performances nettement supérieures et des résolutions efficaces ([Ageenko et al., 2022](#) ; [Duy Quynh et al., 2022](#) ; [Bammou et al., 2024](#)). Les méthodes de ML ont connu des avancées significatives, confirmant leur pertinence pour l'évaluation des risques naturels, avec une précision dépassant celle des approches conventionnelles.

Divers algorithmes de ML sont disponibles pour différentes applications, mais ceux qui sont les plus couramment utilisés dans le cadre des évaluations des risques naturels incluent la forêt aléatoire (RF), la machine à vecteurs de support (SVM), les K-voisins les plus proches (KNN), le boosting de gradient extrême (XGBoost), les réseaux neuronaux artificiels (ANN), les arbres de décision (DT) et la régression logistique (LR).

Parmi ces techniques d'apprentissage automatique utilisées dans cette étude : La Machine à Vecteurs de Support (SVM), qui est l'un de ces modèles. Elle se base sur la recherche d'un hyperplan optimal qui sépare les classes de données, permettant ainsi de classer efficacement les zones à risque

et à faible risque de glissements de terrain. La SVM est particulièrement utile dans des scénarios où les relations entre les variables sont non linéaires, ce qui est souvent le cas dans les phénomènes géomorphologiques.

Un autre modèle largement utilisé est la Forêt Aléatoire (RF). Ce modèle d'ensemble combine plusieurs arbres de décision pour améliorer la précision et réduire le risque de surapprentissage. La RF est capable de traiter des données avec des interactions complexes et des relations non linéaires, tout en fournissant une évaluation de l'importance des caractéristiques. Cela permet non seulement de prédire le risque de glissements de terrain, mais aussi d'identifier les facteurs les plus influents dans ce processus.

La Régression Logistique (LR), bien que plus simple, reste une méthode efficace pour modéliser des relations binaires entre les variables indépendantes et la probabilité d'occurrence d'un glissement de terrain. Sa capacité à estimer les probabilités et à interpréter facilement les coefficients en fait un outil précieux, surtout lorsqu'il est utilisé en complément d'autres modèles plus complexes. La LR permet une analyse rapide et peut servir de référence pour évaluer la performance des modèles d'apprentissage automatique plus avancés.

L'application de ces modèles d'apprentissage automatique dans le cadre de l'analyse des glissements de terrain dans les bassins versants offre des perspectives prometteuses. En intégrant des données géospatiales, des paramètres climatiques, des caractéristiques géologiques et des variables anthropiques, ces modèles peuvent fournir des évaluations précises du risque de glissement de terrain. Ils permettent également d'optimiser les stratégies de gestion des ressources naturelles et de planification urbaine, contribuant ainsi à la résilience des communautés face à ce risque.

I.4.4.1. Machine à vecteurs de support (SVM)

Les glissements de terrain constituent un risque géologique majeur qui peut entraîner des pertes humaines, des dégâts matériels considérables et des perturbations environnementales dans les zones vulnérables. La prévention et la gestion de ces phénomènes nécessitent des outils précis pour évaluer le risque et identifier les zones susceptibles d'être affectées. Dans ce contexte, la Machine à Vecteurs de Support (SVM) se présente comme une méthode d'apprentissage automatique prometteuse pour modéliser et prédire les glissements de terrain dans les bassins versants. La machine à vecteurs de support (SVM) repose sur le concept d'exploration de données et est reconnue comme un algorithme supervisé clé, essentiel pour les tâches de classification et de régression (Naceur et al., 2022 ; Benzougagh et al., 2024).

La SVM est un algorithme de classification puissant qui excelle dans la gestion de données complexes et multidimensionnelles. En traçant un hyperplan optimal qui sépare les classes de données (zones à risque et zones non à risque), la SVM permet de classifier efficacement les différentes zones

d'un bassin versant. Cette méthode est particulièrement adaptée aux situations où les relations entre les variables explicatives et la variable à prédire ne sont pas nécessairement linéaires (Benzougagh et al., 2023). Par conséquent, la SVM est capable de fournir des résultats robustes, même dans des contextes géomorphologiques variés (Figure 7).

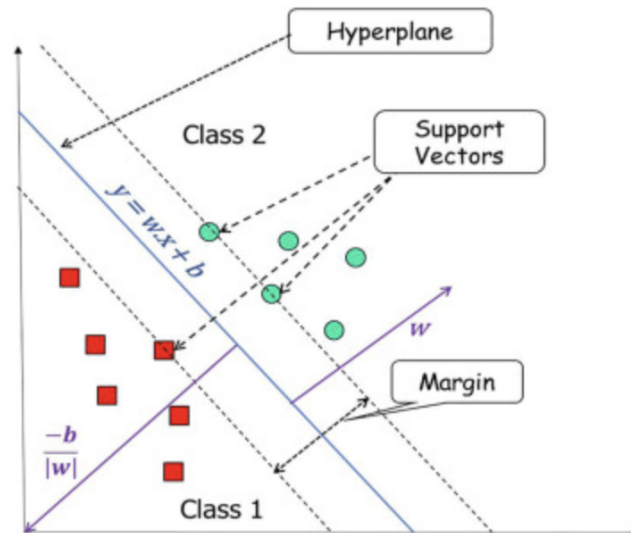


Figure 7 : Hyperplans optimales séparateurs des zones à risque et zones non à risque

La méthodologie pour appliquer le modèle de Machine à Vecteurs de Support (SVM) dans l'analyse des glissements de terrain dans le bassin versant d'oued Amtar se déroule en plusieurs étapes clés. Tout d'abord, **(i)** la collecte de données qui constitue la base de l'analyse. Il est essentiel de rassembler des données géospatiales, notamment des informations sur la topographie, l'hydrologie et la géologie de la région. Des données climatiques, telles que les précipitations et la température, doivent également être obtenues. Parallèlement, il est important de collecter des informations sur les caractéristiques des sols, incluant leur texture, leur humidité et leur résistance à l'érosion. Enfin, l'évaluation des facteurs anthropiques, tels que l'impact des activités humaines sur la stabilité des pentes, complète cette étape.

Une fois les données collectées, **(ii)** la préparation des données est cruciale pour garantir leur qualité. Cela inclut le nettoyage des données, où il est nécessaire d'identifier et de traiter les valeurs manquantes ou aberrantes. La normalisation des variables est également effectuée pour assurer qu'elles aient des échelles similaires, évitant ainsi que certaines variables dominent le modèle. De plus, des techniques statistiques sont utilisées pour sélectionner les caractéristiques les plus significatives à inclure dans l'analyse.

(iii) La construction du modèle SVM suit cette préparation. Dans cette étape, le jeu de données est divisé en deux ensembles : un pour l'entraînement (généralement 70 à 80 %) et un pour le test (20 à 30 %). Le choix du noyau est une étape clé, où l'on sélectionne le type de noyau (linéaire, polynomial,

radial) en fonction des caractéristiques des données. L'entraînement du modèle est alors réalisé en utilisant l'ensemble d'entraînement, avec un accent sur l'optimisation de la marge entre les classes.

Une fois le modèle construit, il est essentiel de procéder **(iv)** à la validation et à l'évaluation du modèle. Cela implique de tester la performance du modèle à l'aide de l'ensemble de test, en calculant des métriques telles que la précision, le rappel et la F-mesure. Des techniques de validation croisée sont également appliquées pour tester la robustesse du modèle et éviter le surapprentissage.

L'étape suivante consiste en **(v)** l'interprétation des résultats. Cela comprend l'élaboration de cartes thématiques représentant les zones à risque de glissement de terrain, classées par niveaux de risque (élevé, modéré, faible). L'analyse des facteurs de risque permet d'identifier les variables ayant le plus d'impact sur la prédiction des glissements de terrain, ce qui contribue à une meilleure compréhension des mécanismes sous-jacents.

Enfin, **(vi)** l'étape des recommandations pour la gestion qui peuvent être formulées sur la base des résultats obtenus. Cela inclut des propositions d'interventions, telles que des mesures de prévention, des stratégies d'aménagement du territoire et des plans d'urgence pour les zones identifiées comme à risque élevé. Pour assurer la durabilité des résultats, un système de suivi doit être mis en place pour évaluer l'efficacité des mesures prises, tout en permettant d'ajuster le modèle en fonction de nouvelles données ou de changements environnementaux.

I.4.4.2. Forêt aléatoire (RF)

La forêt aléatoire est un algorithme d'apprentissage automatique qui classe les données d'entrée en s'appuyant sur un ensemble d'arbres de décision (Liu et al., 2017). Le modèle Random Forest, ou forêt aléatoire, est une méthode d'apprentissage automatique très performante et robuste pour prédire la susceptibilité aux glissements de terrain. Il s'agit d'un ensemble d'arbres de décision construits de manière aléatoire, chacun étant entraîné sur un sous-ensemble aléatoire des données d'apprentissage (Liu et al., 2021 ; Benzougagh et al., 2024).

Cette approche par ensemble permet d'obtenir une grande diversité au sein de la forêt, ce qui améliore la robustesse du modèle final. Pour classer une nouvelle observation, le modèle Random Forest effectue un vote majoritaire parmi les prédictions de tous les arbres, réduisant ainsi les biais et la variance du modèle (Youssef et al., 2016 ; Xu et al., 2023).

Un avantage important du Random Forest est qu'il peut fournir une mesure de l'importance relative de chaque variable d'entrée (facteurs topographiques, géologiques, etc.) dans la prédiction de la susceptibilité aux glissements. Cela aide les utilisateurs à identifier les facteurs les plus pertinents pour ce type d'application (Ho, 1995 & 1998 ; Breiman, 2001).

$$H(X) = \text{av}_k \max \sum_{i=1}^k I(h_i(X) = Y)$$

Avec : a indique la moyenne, et la fonction indicatrice est notée I. v_k

Le modèle RF présente de nombreux avantages, tels que : (i) la détermination des corrélations entre les variables sans générer d'hypothèses centrales (Darminto et Chu, 2019) ; (ii) être un meilleur programme d'apprentissage automatique pour évaluer les situations hiérarchiques dans le big data (Darminto et Chu, 2019) ; (iii) classer les variables indépendantes en fonction de leur importance (Youssef et al., 2015) ; (iv) Cette approche a également l'avantage d'éliminer méticuleusement le problème du surajustement des données en (i) construisant plusieurs arbres, (ii) amorçant les observations et (iii) divisant les nœuds en divisions optimales au sein d'un sous-ensemble aléatoire (Merghadi et al.2020).

De plus, le modèle Random Forest est particulièrement adapté pour traiter des bases de données complexes et hétérogènes, comme c'est souvent le cas dans le domaine de la cartographie des glissements de terrain. Il est également relativement robuste à la présence de valeurs manquantes dans les données d'entrée, ce qui constitue un avantage supplémentaire (Figure 8).

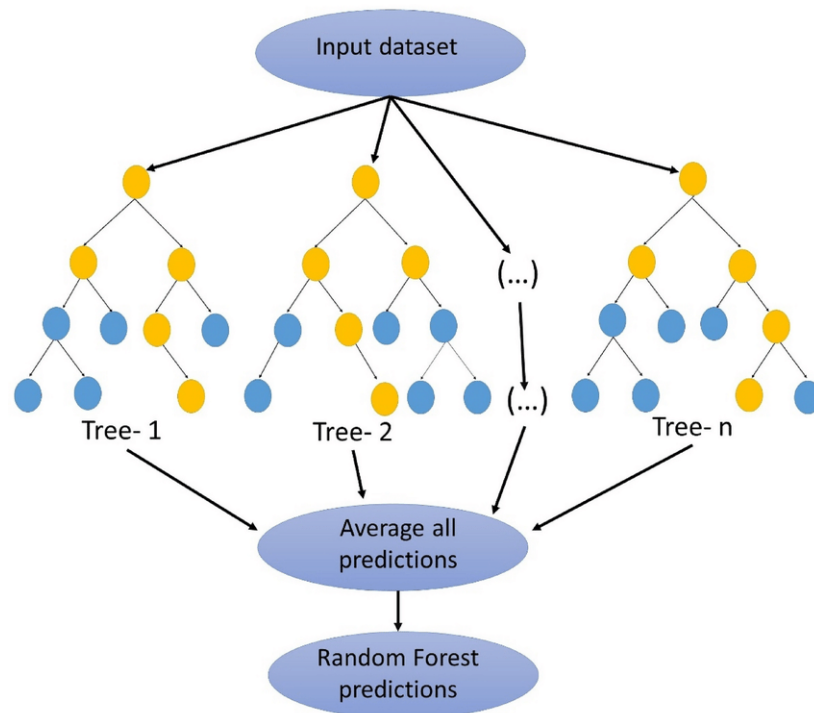


Figure 8 : Schéma de l'algorithme de la forêt aléatoire (Sahour et al., 2021)

I.4.4.3. Régression logistique (LR)

Le modèle de régression logistique (LR) est également connu sous le nom d'analyse multivariée est l'un des modèles statistiques les plus utilisés en cartographie. Le modèle de régression logistique (LR) est une méthode d'apprentissage supervisé très utilisée pour la classification binaire, comme la

prédiction de la susceptibilité aux glissements de terrain (présence/absence). Contrairement au modèle SVM qui cherche à trouver l'hyperplan optimal séparant les deux classes, le LR modélise directement la probabilité d'appartenance à l'une des classes en fonction des variables explicatives.

Le modèle logistique est basé sur la fonction logistique. La particularité de la fonction logistique est que pour les valeurs comprises entre moins et plus l'infini, elle ne prend toujours que des valeurs comprises entre 0 et 1 (présence ou absence), (*Figure 9*) et il est déterminé par une ou plusieurs variables indépendantes (*Menard, 2002*). Il clarifie la relation entre une variable catégorielle et certains facteurs dépendants, qui peuvent être des variables catégorielles, continues ou binaires (*Dou et al., 2018*). L'avantage de l'algorithme est que les variables ne nécessitent pas une distribution normale (*Pradhan et al., 2010 ; Bammou et al., 2024*). Les variables indépendantes dans le LR peuvent être désignées par 0 et 1, indiquant l'absence ou la présence d'un risque. La sortie du modèle varie entre 0 et 1 et représente la susceptibilité aux risques.

Cette approche permet de modéliser la relation entre les différents facteurs de prédisposition et de déclenchement des glissements de terrain et la probabilité d'occurrence de ces phénomènes, selon les équations suivantes.

$$P=1/(1+\exp-z)$$

Avec :

P : est la probabilité d'occurrence d'un glissement de terrain dont les valeurs estimées varient de 0 à 1.

Z : est un facteur causal de glissement de terrain et est supposée être une combinaison linéaire des facteurs causaux X_j ($i = 1, 2, \dots, n$) selon l'équation suivante :

$$Z=e-(\beta_0+\beta_1x_1+\beta_2x_2+\beta_3x_3+..... \beta_ix_i)$$

Avec :

β_i : est le coefficient de régression optimal reflétant les contributions de chaque facteur

β_0 : est le coefficient constant ; x_i est les facteurs de conditionnement d'entrée ;

P : est la probabilité d'occurrence des glissements de terrain.

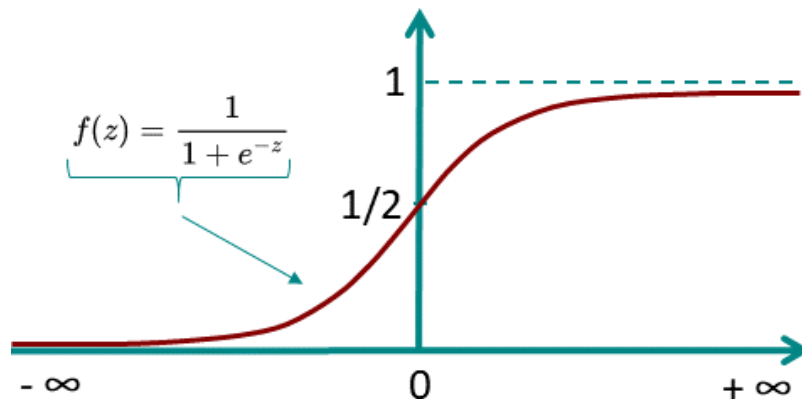


Figure 9 : Modèle de la régression logistique

I.4.5. Résultats et discussions

Cette section se concentre sur les approches méthodologiques appliquées dans cette thèse et les résultats obtenus pour estimer l'évolution et quantifier les pertes de sol, tant actuelles que prévisionnelles. Elle vise également à établir des cartes de susceptibilité à l'érosion hydrique, aux glissements de terrain et aux inondations dans le bassin versant de l'oued Amtar (Rif-Maroc).

I.4.5.1. Prioritisation des zones à risque d'érosion hydrique par analyse morphométrique

L'évaluation du risque d'érosion hydrique dans le bassin versant de l'oued Amtar offre une analyse approfondie des sous-bassins, utilisant des méthodes d'analyses morphométriques pour identifier et prioriser les zones des risques d'érosion hydrique. L'étude a permis de délimiter 20 sous-bassins à l'aide des systèmes d'information géographique (SIG), et la télédétection spatiale facilitant ainsi l'identification des zones contributrices à l'écoulement et la définition précise des limites de drainage (Benzougagh et al., 2020).

Les caractéristiques morphométriques, telles que l'ordre des cours d'eau, le nombre de segments et leur longueur totale, ont été calculées, révélant une diversité significative. Ces variations suggèrent des différences dans la topographie et le potentiel d'érosion des sols, avec certains sous-bassins montrant des conditions d'érosion plus actives (Lakhili et al., 2021). Les sous-bassins ont ensuite été classés en fonction de paramètres morphométriques influençant la susceptibilité à l'érosion, tels que la densité de drainage et le rapport de bifurcation, permettant d'établir un classement prioritaire pour les interventions de conservation.

L'étude conclut que près de 60 % de la superficie du bassin présente un potentiel d'érosion élevé à très élevé, confirmant ainsi la vulnérabilité de cette région à l'érosion (El Brahimi et al., 2023 ; 2024). Parmi les principaux facteurs de risque identifiés, on trouve des pentes raides, qui augmentent la sensibilité à l'érosion en accélérant le ruissellement et le détachement des sols (Al-Quraishi, 2003 ; Benzougagh et al., 2017). Une couverture végétale limitée offre une protection insuffisante contre les pluies, favorisant ainsi le ruissellement (Liu et al., 2020 ; El Brahimi et al., 2022 ; Hossini et al., 2022 ;

Singh et al., 2023). De plus, la nature géologique des sols, avec une faible capacité d'infiltration, accentue ce risque (Zhao et Hou, 2019 ; Benzougagh et al., 2020 ; Neupane et al., 2023 ; Chen et al., 2023).

L'analyse a mis en lumière plusieurs sous-bassins particulièrement vulnérables, notamment les sous-bassins 4, 7, 15, 18, 19 et 20, qui représentent 30 % de la surface totale. Ces zones se distinguent par des pentes élevées, une couverture végétale réduite et une sensibilité accrue des sols à l'érosion.

L'impact des pratiques d'utilisation des terres a également été souligné. La déforestation, l'agriculture intensive et l'urbanisation exacerbent le risque d'érosion en augmentant le ruissellement et en diminuant l'infiltration. Ces interactions complexes entre facteurs environnementaux et activités humaines nécessitent une approche de gestion proactive pour prévenir l'érosion.

Les résultats de cette étude mettent en avant plusieurs recommandations clés. D'abord, il est essentiel d'orienter les efforts de gestion vers les sous-bassins les plus vulnérables, en mettant en œuvre des mesures de protection et de restauration. Ensuite, l'intégration de méthodes empiriques, de la télédétection spatiale et des SIG est cruciale pour évaluer le risque d'érosion hydrique et développer des stratégies de gestion durable des ressources naturelles. La collaboration interdisciplinaire entre chercheurs, décideurs politiques et gestionnaires des ressources est également primordiale pour élaborer des solutions efficaces.

Enfin, l'étude encourage la poursuite des recherches afin d'améliorer la précision des modèles, en intégrant des facteurs comme la variabilité climatique et l'impact de l'urbanisation. L'évaluation des conséquences de l'érosion sur la qualité des sols, des ressources en eau et de la biodiversité doit également être une priorité.

En conclusion, cette étude constitue une avancée significative dans la compréhension de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'oued Amtar et dans le Rif marocain. Les résultats soulignent l'urgence de gérer les ressources naturelles de manière intégrée et durable, de protéger les écosystèmes sensibles à l'érosion, et de promouvoir des pratiques agricoles durables. Ces actions sont essentielles pour garantir la durabilité des sols et la préservation des écosystèmes dans cette région vulnérable.

I.4.5.2. Quantification des pertes en sol par modèle d'érosion potentielle (EPM)

L'application du modèle EPM dans le bassin versant de l'oued Amtar a révélé une variabilité significative des taux d'érosion hydrique, influencée par plusieurs facteurs environnementaux. Grâce à des analyses basées sur des données géospatiales issues de la télédétection spatiale et des informations collectées sur le terrain, les principaux paramètres évalués incluent la sensibilité des sols à l'érosion (Y), les pentes (Ja), le coefficient de protection des sols (Xa), le taux d'érosion (ϕ) et le coefficient d'érosion (Z).

Le facteur de sensibilité (Y) des sols a été déterminé en fonction de leurs propriétés intrinsèques, telles que la texture, la structure et la perméabilité. Les résultats montrent que dans la zone d'étude, les valeurs du coefficient Y varient de 0,14 à 0,43, indiquant qu'une grande partie de la surface est classée comme très sensible à l'érosion. Ces résultats corroborent les travaux de Gavrilovic (1988) et Wischmeier et Smith (1978), qui soulignent l'importance de la texture du sol dans la détermination de sa vulnérabilité à l'érosion hydrique. Les sols ayant une texture fine ou une faible cohésion sont plus susceptibles d'être érodés par les agents hydriques, ce qui accentue le besoin de pratiques de gestion adaptées.

Les pentes mesurées à l'aide de modèles numériques de terrain montrent des valeurs élevées, qui dépassant 63,75 %. Cette topographie généralement raide contribue à augmenter la vitesse du ruissellement, exacerbant ainsi le potentiel d'érosion (Zhao et Hou, 2019). Des pentes plus abruptes facilitent le transport rapide des sédiments, posant ainsi un risque sérieux pour la qualité des sols et la gestion des ressources en eau. L'interaction entre la pente et la dynamique de l'eau de pluie est essentielle pour comprendre les taux d'érosion hydrique dans cette région.

Le coefficient de protection (X_a) est un élément crucial pour évaluer la vulnérabilité des sols. Les résultats montrent une large variation de X_a , allant de 0,11 dans des zones à forte couverture végétale à 0,85 dans des zones dénudées. Une couverture végétale adéquate joue un rôle essentiel dans la protection des sols contre l'érosion, réduisant l'impact des précipitations sur la surface du sol. Plusieurs études, notamment celles de Liu et al. (2020) ; Lakhili et al., (2021) et Hossini et al. (2022), soulignent l'importance de la végétation pour atténuer l'érosion en favorisant l'infiltration de l'eau et en diminuant le ruissellement.

Le coefficient de taux d'érosion (ϕ) a été évalué en fonction des conditions locales et des pratiques de gestion. Les valeurs de ϕ varient entre 0,31 et 0,61, et plus de la moitié du bassin versant est classée comme ayant un état érosif très élevé. Ces résultats soulignent l'urgence d'adopter des pratiques de gestion durable pour atténuer les impacts de l'érosion hydrique sur la qualité des sols et les ressources naturelles. Les pratiques agricoles inappropriées, souvent observées dans la région, peuvent exacerber le phénomène d'érosion hydrique, comme l'indiquent les recherches de Bazhenova et al. (2022) et Ghosh et al. (2022).

L'indice de potentiel d'érosion (Z) permet d'identifier les zones à risque élevé d'érosion. Les résultats montrent que les zones présentant des valeurs Z élevées coïncident souvent avec des pentes raides et une faible couverture végétale. Ce constat est en accord avec des recherches antérieures qui démontrent que les zones dénudées et les pentes abruptes sont plus susceptibles de subir des pertes de sol (Chen et al., 2023). La corrélation entre ces facteurs souligne la nécessité d'une approche intégrée pour la gestion des terres afin de réduire les risques d'érosion.

Les résultats obtenus par cette thèse mettent en lumière les dynamiques complexes de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'oued Amtar. La variabilité des coefficients Y , Ja , Xa , ϕ et Z indique que la région est particulièrement vulnérable à l'érosion, en raison de facteurs à la fois environnementaux et anthropiques. Des pratiques telles que l'agriculture intensive, surpâturage et le déboisement aggravent la situation, rendant la région encore plus sujette à l'érosion des sols.

L'érosion hydrique a des conséquences significatives sur la productivité agricole, la stabilité des populations et la durabilité environnementale. Les pertes de sol entraînent une diminution de la fertilité des terres, ce qui réduit les rendements des cultures. Cette dynamique a été bien documentée dans la littérature, notamment par Al-Quraishi (2003), Benzougagh et al (2016, 2020) qui a souligné que l'érosion des sols peut entraîner une réduction significative de la production agricole. De plus, l'érosion accroît la sédimentation dans les cours d'eau, affectant la qualité de l'eau ainsi que la biodiversité aquatique. La dégradation des sols peut également entraîner une perte de biodiversité, avec des impacts sur les écosystèmes locaux.

Pour atténuer les impacts de l'érosion, il est essentiel d'adopter des pratiques de gestion durable. Les résultats de cette étude soulignent l'importance de la conservation des sols et de la végétation. Des techniques telles que le labour de conservation, la plantation de cultures de couverture et l'agroforesterie peuvent jouer un rôle clé dans la réduction du ruissellement et la protection des sols. Des études antérieures, comme celles de Wassie (2020) et Bammou et al. (2023), ont démontré que ces pratiques peuvent réduire considérablement les taux d'érosion hydrique.

En outre, la combinaison de l'EPM avec d'autres méthodes d'évaluation de l'érosion pourrait fournir une image plus complète des risques d'érosion. Les méthodes de télédétection spatiale, par exemple, peuvent être intégrées pour surveiller les changements dans la couverture végétale et les conditions des sols au fil du temps. Cette approche permettrait une gestion proactive des ressources naturelles, comme le suggèrent Almagro et al. (2019) et Mehwish et al. (2024), qui ont montré que la télédétection peut fournir des données précieuses pour la gestion des terres.

I.4.5.3. Quantification des pertes en sol par l'équation universelle révisée (RUSLE)

L'application de l'équation universelle révisée de perte de sol (RUSLE) permet d'évaluer le risque d'érosion et de guider les stratégies de conservation des sols. Cette synthèse présente les résultats issus des facteurs intégrés dans l'équation RUSLE, tout en interprétant leur impact sur les dynamiques d'érosion hydrique dans le bassin versant.

Le facteur R , qui représente l'érosivité des précipitations, est fondamental pour évaluer la susceptibilité à l'érosion dans le bassin versant. Les résultats montrent une variabilité significative des valeurs de R , allant de 801,472 à 3727,276 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹. Les stations situées à des altitudes élevées, comme le Jbel Outka, affichent des valeurs élevées, indiquant un potentiel érosif accru des pluies dans

ces zones. Cette variabilité est influencée par des facteurs tels que l'intensité et la répartition saisonnière des pluies, comme le soulignent Wischmeier et Smith (1978). L'analyse spatiale du facteur R met en évidence que les zones les plus vulnérables à l'érosion hydrique sont celles avec des précipitations intenses. Par conséquent, les mesures de protection des sols doivent être prioritaires dans ces secteurs, notamment dans les communes d'Ijadue et Loulane.

Le facteur K évalue l'érodibilité des sols, qui dépend de leurs caractéristiques pédologiques, telles que la texture, la structure et la teneur en matière organique. Les valeurs de K dans le bassin varient de 0,14 à 0,139288 t ha h/ha/MJ/mm, indiquant une érodibilité modérée des sols. Cependant, les zones avec une protection végétale limitée, en particulier dans la partie aval, montrent une érodibilité légèrement plus élevée. L'évaluation du facteur K s'est fondée sur l'analyse des échantillons de sol et les données de la FAO, fournissant une estimation fiable de la propension des sols à subir l'érosion. L'homogénéité des valeurs de K à travers le bassin suggère que des stratégies de gestion ciblées doivent être mises en place pour renforcer la couverture végétale et améliorer la structure des sols, réduisant ainsi leur vulnérabilité à l'érosion, comme le note Roose (1994).

Le facteur LS, qui combine la longueur et l'inclinaison des pentes, joue un rôle crucial dans le processus d'érosion. Les résultats montrent une large gamme de valeurs pour le facteur LS, allant de 0 à 309, ce qui reflète la variabilité topographique du bassin. Les zones avec des pentes prononcées, affichant des valeurs de LS élevées, sont particulièrement sujettes à l'érosion. L'utilisation d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) a permis de cartographier la topographie avec précision, révélant que les secteurs à forte pente sont également ceux où le ruissellement est le plus important. Ces zones nécessitent une attention particulière pour la mise en place de pratiques antiérosives, telles que les cultures en courbes de niveau et les terrasses, comme mentionné par Benzougagh et al. (2020).

Le facteur C quantifie l'effet protecteur de la couverture végétale sur l'érosion des sols. Les résultats montrent que les valeurs de C varient considérablement selon le type de couverture. Les sols bien couverts par la végétation présentent des valeurs de C très faibles (0,001), tandis que les sols nus atteignent des valeurs de 1. Cette variabilité souligne l'importance d'une gestion appropriée de la couverture végétale pour réduire l'impact des précipitations sur l'érosion. L'analyse du NDVI a permis de distinguer les zones de forte et faible couverture végétale, indiquant que les zones soumises à un surpâturage et à des pratiques agricoles intensives sont particulièrement vulnérables à l'érosion. La mise en œuvre de pratiques de gestion durable, telles que la rotation des cultures et la plantation de cultures de couverture, est essentielle pour améliorer la résilience des sols face à l'érosion, comme le souligne Jensen (2000) et El Brahimi et al., (2022).

Enfin, le facteur P évalue l'impact des pratiques de gestion des sols sur l'érosion. Les résultats montrent que les pratiques antiérosives, comme les cultures en bandes et les reboisements, sont cruciales

pour réduire l'érosion. Les valeurs du facteur P varient selon l'efficacité des pratiques mises en œuvre et peuvent aller de 0,25 à 1. L'évaluation des pratiques actuelles dans le bassin versant de l'oued Amtar révèle que les mesures de conservation des sols sont souvent insuffisantes, en particulier dans les zones à forte érosivité. Il est donc impératif de renforcer les initiatives de sensibilisation et de formation des agriculteurs sur l'importance des pratiques antiérosives pour protéger les sols et maintenir leur productivité, comme le soulignent Zouagui et al. (2018).

Les résultats obtenus à partir de l'application de l'équation RUSLE dans le bassin versant de l'oued Amtar offrent une compréhension approfondie des dynamiques d'érosion hydrique dans la région. La variabilité des facteurs d'érosion met en lumière la nécessité d'adapter les stratégies de gestion à la réalité locale. L'intégration des données climatiques, pédologiques et topographiques, couplée à des outils de SIG, permet d'obtenir une cartographie précise des zones à risque. Cette approche est essentielle pour orienter les efforts de conservation des sols et minimiser les pertes liées à l'érosion.

Il est également important de noter que l'érosion hydrique ne se limite pas à des pertes de sol, mais entraîne également des conséquences écologiques et socio-économiques significatives, y compris la dégradation des habitats, la réduction de la biodiversité et l'impact sur la productivité agricole. Les résultats de cette étude soulignent l'urgence d'une approche intégrée pour la gestion des ressources en sols, prenant en compte les interactions complexes entre les différents facteurs d'érosion hydrique.

En conclusion, l'évaluation du risque d'érosion hydrique dans le bassin versant de l'oued Amtar à l'aide de l'équation RUSLE fournit des informations essentielles pour la gestion durable des sols. Les résultats mettent en évidence l'importance des facteurs R, K, LS, C et P dans la dynamique d'érosion hydrique, et soulignent la nécessité d'adopter des pratiques de conservation des sols adaptées aux spécificités locales. Les recommandations découlant de cette étude incluent l'amélioration de la couverture végétale, l'adoption de pratiques antiérosives efficaces et la sensibilisation des agriculteurs à l'importance de la gestion durable des sols. L'intégration de ces mesures dans les politiques de gestion des ressources naturelles est essentielle pour préserver la qualité des sols et garantir la durabilité des systèmes agricoles dans la région.

I.4.5.4. Cartographie de la susceptibilité aux glissements par les modèles (SVM ; RF et RL)

Les résultats d'utilisation de modèles d'apprentissage automatique dans le bassin versant de l'oued Amtar ont mis en évidence plusieurs facteurs ayant une influence significative sur la susceptibilité aux glissements de terrain. Parmi ces facteurs, la topographie joue un rôle majeur. En effet, l'inclinaison des pentes est un indicateur clé : les pentes plus raides présentent une susceptibilité accrue aux mouvements de terrain en raison d'une saturation rapide des sols et d'une augmentation de la pression interstitielle. Des analyses géomorphométriques, telles que l'indice de position topographique (TPI) et l'indice

d'humidité topographique (TWI), ont également montré une corrélation avec la stabilité des versants, confirmant l'importance de ces paramètres dans l'évaluation des risques.

Un autre facteur crucial est la géologie, notamment la lithologie et la présence de failles géologiques. Les formations géologiques moins résistantes aux intempéries, comme les sédiments meubles, sont particulièrement vulnérables aux mouvements de terrain. Les zones situées à proximité de failles géologiques présentent une vulnérabilité accrue, souvent due à la déformation tectonique qui peut affaiblir la structure des sols.

L'hydrologie a également révélé des impacts significatifs sur la stabilité des pentes. Les données concernant la distance des rivières et la présence de zones humides ont été déterminantes. L'érosion des berges des cours d'eau contribue à la déstabilisation des versants, tandis que l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) a été utilisé pour évaluer la couverture végétale. Cette couverture joue un rôle essentiel en stabilisant les sols grâce à ses racines, réduisant ainsi le risque de glissements.

Enfin, les facteurs anthropiques, tels que l'urbanisation et la construction d'infrastructures, s'avèrent être des aggravants. L'analyse des données d'occupation du sol a mis en lumière que les activités humaines, notamment les terrassements et le déboisement, augmentent la vulnérabilité des pentes aux glissements. Les routes, en particulier, modifient la géométrie des pentes et peuvent induire des vibrations qui fragilisent les sols, accentuant ainsi le risque de mouvements de terrain.

Les résultats obtenus soulignent l'importance d'une approche intégrée pour la cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain. Les modèles d'apprentissage automatique se sont révélés efficaces pour traiter des ensembles de données complexes et hétérogènes, permettant ainsi une meilleure compréhension des interactions entre les différents facteurs de risque. L'intégration des systèmes d'information géographique (SIG) avec ces modèles a permis une visualisation efficace des résultats. Les SIG jouent un rôle clé dans l'acquisition, le stockage et l'analyse des données géospatiales, facilitant la dérivation de nouvelles variables explicatives. Cette synergie entre les SIG et les modèles d'apprentissage automatique renforce la capacité à produire des cartes de susceptibilité fiables et précises.

Les implications de cette étude sont significatives pour la gestion des risques de glissements de terrain dans le bassin versant de l'oued Amtar. La cartographie de la susceptibilité permet aux décideurs de cibler les zones à haut risque pour la mise en place de mesures de prévention et d'atténuation. Par exemple, la planification urbaine doit tenir compte des zones identifiées comme vulnérables afin de minimiser les impacts des activités humaines sur la stabilité des pentes.

En conclusion, cette étude met en exergue l'importance des modèles d'apprentissage automatique dans la cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain. Les résultats indiquent que la combinaison de données géospatiales, de modèles robustes et d'une approche intégrée avec les SIG peut

fournir des informations cruciales pour la gestion des risques. L'analyse des facteurs de prédisposition et de déclenchement permet de mieux comprendre les dynamiques des mouvements de terrain et de développer des stratégies de prévention adaptées. Des recherches futures devraient se concentrer sur l'affinement des modèles et l'intégration de données temporelles pour une évaluation dynamique des risques.

Conclusion du chapitre I

Pour conclure ce chapitre, nous avons exploré les principales causes et les impacts de l'érosion hydrique et des mouvements de terrain dans les régions montagneuses du Rif, et plus particulièrement dans le bassin versant de l'oued Amtar. La vulnérabilité de cette région résulte d'une combinaison de facteurs causatifs comme la topographie accidentée, la géologie fragile, et les épisodes de précipitations intenses, et de pressions anthropiques, notamment la déforestation, les pratiques agricoles non durables, et l'urbanisation non planifiée. Ces éléments accélèrent les processus érosifs et augmentent les risques pour les sols, les infrastructures, et les populations locales.

L'analyse montre que la gestion de ces risques nécessite une approche intégrée incluant des stratégies de conservation des sols et de gestion des ressources en eau, adaptées aux spécificités géologiques et climatiques de la région. En parallèle, l'intégration de la télédétection, des SIG et des modèles de machine learning pourrait renforcer les capacités de cartographie et de prédiction des zones à risque, permettant ainsi une planification plus efficace et durable. Ce chapitre pose donc les bases pour les analyses détaillées des risques et des solutions préventives dans les chapitres suivants, en fournissant une compréhension approfondie des dynamiques en jeu et des interventions nécessaires pour réduire l'impact de ces phénomènes sur le territoire.

CHAPITRE II : PRESENTATION DU SECTEUR D'ETUDE

Résumé du chapitre II

Ce chapitre analyse en détail les caractéristiques géographiques, géologiques, hydrologiques et socio-économiques du bassin versant de l'oued Amtar, situé dans la région du Rif, au nord du Maroc. Ce bassin de 300 km², caractérisé par un relief très accidenté avec des altitudes allant de 0 à plus de 2000 mètres, présente des risques accrus d'érosion hydrique et de mouvements de terrain, exacerbés par une pente moyenne élevée. L'analyse morphométrique et hypsométrique permet de mieux comprendre la susceptibilité du bassin aux processus d'érosion et d'instabilité des versants, notamment dans les zones de forte pente et à proximité des failles géologiques. Le bassin est également soumis à une variabilité climatique importante, avec des cours d'eau intermittents qui dépendent principalement des précipitations et de la fonte des neiges, contribuant à un ruissellement important. Géologiquement, il se situe à la jonction de nappes de flysch imperméables et de formations plus résistantes du domaine interne, influençant les phénomènes d'infiltration et de drainage. Le cadre socio-économique révèle des disparités marquées entre les communes rurales et semi-urbaines, où l'agriculture et l'élevage dominent une économie fragile, avec des taux de pauvreté atteignant 35 % dans les zones les plus enclavées. Ces éléments, combinés à une tectonique active, accentuent la vulnérabilité du bassin aux risques naturels, justifiant une gestion intégrée des ressources pour atténuer les effets de l'érosion et assurer un développement durable

Ce chapitre fournit une base essentielle pour l'analyse des risques naturels et des dynamiques environnementales dans le bassin versant de l'oued Amtar, avec une attention particulière aux processus d'érosion et MT et à la gestion des ressources naturelles

II.1. Introduction

Les caractéristiques physiques d'un bassin versant jouent un rôle essentiel dans sa réponse hydrologique, et donc dans les risques naturels auxquels il est exposé. Le relief, la forme et le réseau hydrographique constituent les principaux paramètres influençant les processus d'érosion hydrique, de glissements de terrain et d'inondations (Alcántara-Ayala, 2002 ; Meraj et al., 2015).

L'étude des propriétés géométriques du bassin, ou orométrie, permet de quantifier ces paramètres clés. Par exemple, la pente moyenne, l'indice de compacité ou la densité de drainage renseignent sur la susceptibilité aux crues éclair et à l'érosion hydrique. De même, la distribution altimétrique du bassin aide à identifier les zones les plus exposées aux glissements de terrain (Adnan et al., 2019 ; Abu El-Magd et al., 2021).

Ainsi, une analyse morphométrique détaillée du bassin versant est primordiale pour évaluer les risques naturels auxquels il est soumis. Elle constitue un outil essentiel pour orienter une gestion intégrée et durable des ressources en sol, eau, des écosystèmes et des aménagements, visant à prévenir et réduire les impacts des phénomènes d'érosion hydrique, de glissements de terrain et d'inondations (Benzougagh et al., 2017 ; Vig et al., 2022).

Cette approche holistique, prenant en compte les caractéristiques physiques du bassin, permet de mieux comprendre son fonctionnement hydrologique et de cibler les zones les plus vulnérables. Elle est cruciale pour développer des stratégies de gestion des risques naturels adaptées au contexte local et pérennes sur le long terme.

II.2. Bassin versant de l'oued Amtar

II.2.1. Situation géographique

Le bassin versant de l'oued Amtar est un bassin important au nord du Maroc, il est situé dans la province de Chefchaouen, dans la région montagneuse du Rif au nord-ouest du Maroc (région de Tanger-Tétouan-Al Hoceima), d'où il tient sa grande diversité climatique, géomorphologique, géologique, pédologie, topographique...etc.

Il s'étend sur une superficie d'environ 300 km². Ses limites géographiques sont : au nord, le bassin versant est bordé par la mer Méditerranée, avec un exutoire situé à des coordonnées géographiques précises, à savoir X :555 115,06 m et Y :516 611,278 m. Au sud, la limite du bassin est constituée par la chaîne montagneuse de Bab Berred (*Figure 10*)

D'un point de vue des coordonnées géographiques, le bassin versant s'étend entre les latitudes 35°N au sud et 35°15'N au nord. Sur l'axe est-ouest, il est compris entre les longitudes 4°40'W à l'ouest et 4°50'W à l'est (El Brahimi et al., 2022).

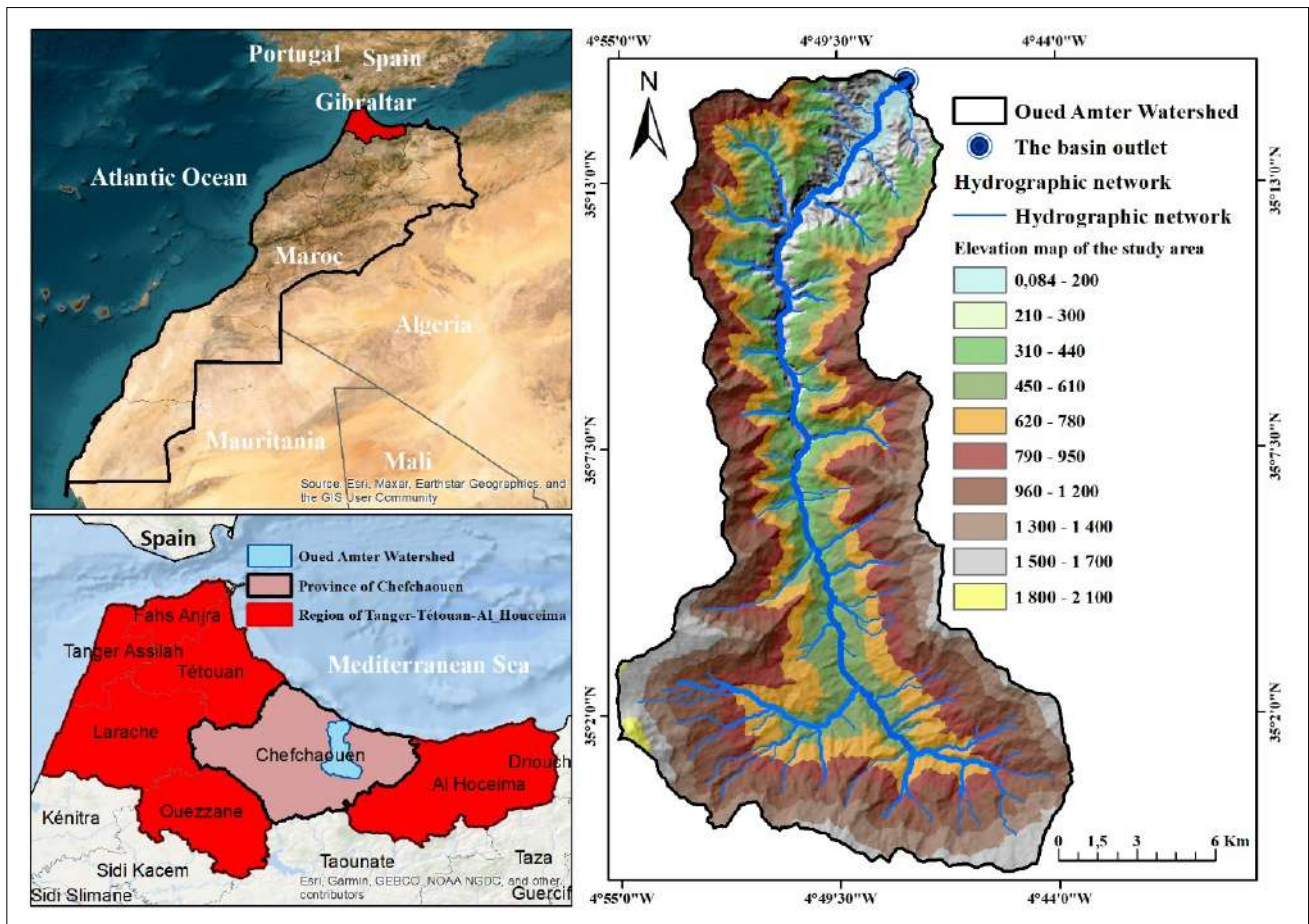


Figure 10 : Situation géographique de la zone d'étude (bassin versant de l'oued Amtar)

II.2.2. Caractéristiques socio-économiques et démographiques

Le territoire du bassin englobe huit communes (Bab Berred, Iounane, Tamorot, Bni Bouzra, Amtar, Bni Rzine et Bni Smih très partiellement) sur une superficie de 300 km².

Sur le plan démographique, les données les plus récentes de recensement de 2004 et 2014 (HCP, 2014) indiquent respectivement que la population résidant dans le bassin versant s'élève à environ 149 908 et 163 485 habitants répartis dans huit communes rurales et semi-urbaines. On observe une croissance démographique soutenue, avec un taux d'accroissement naturel avoisinant les 0,89% par an ces dernières années (Tableau 1).

Tableau 1 : Recensement de la population du bassin versant de l'oued Amtar par communes en 2004 et 2014

Communes	2004	2014	Taux d'accroissement Annuel moyen
Cercle : Bab Berred			
Bab Berred	25	25	0,23
Dont Centre : Bab	5	4	-0,13
Iounane	23	25	0,79
Tamorot	22	26	1,74
Cercle : Bou Ahmed			
Bni Bouzra	15	16	0,83
Bni Mansour	18	20	1,16
Cercle : Jebha			
Amtar	10	10	0,52
Bni Rzine	19	20	0,65
Bni Smih	15	16	0,87

Sur le plan socio-économique, le bassin versant présente des disparités importantes entre les zones rurales et les centres semi-urbains. Les activités économiques sont dominées par l'agriculture (céréaliculture, arboriculture fruitière), l'élevage et l'artisanat. Le taux de pauvreté monétaire varie ainsi de 15% dans les centres semi-urbains à plus de 35% dans certaines communes rurales enclavées.

Les infrastructures de base (routes, eau potable, électrification) connaissent également des niveaux de couverture hétérogènes, avec des déficits plus marqués dans les zones montagneuses et isolées du bassin versant. Cela entrave l'accès aux services publics et limite les opportunités de développement économique.

En termes d'indicateurs de développement humain, les données disponibles font état de taux d'alphabétisation et de scolarisation relativement faibles, surtout chez les populations féminines rurales. Cela soulève des enjeux majeurs en matière d'éducation et d'autonomisation des femmes.

II.2.3. Caractéristiques physiques

Les caractéristiques physiques d'un bassin versant influencent fortement sa réponse hydrologique, et notamment le régime des écoulements en période de crue ou d'étiage. Ces facteurs, d'ordre seulement géométrique ou physique, s'estiment facilement à partir des cartes en général ou en recourant à des techniques digitales et à des modèles numériques du terrain.

L'hydrologie des cours d'eau ainsi que de leur dynamisme dépendent vivement des caractéristiques physiques du bassin versant correspondant. Le relief, la forme et le réseau hydrographique constituent les principaux paramètres de l'étude physique du bassin versant en vue de caractériser son comportement vis-à-vis des différentes unités géologiques qu'il traverse.

L'étude des propriétés géométriques des bassins versant, également appelée orométrie tente de décrire par des expressions quantitatives ou numériques. Dans le passé, l'orométrie se limitait à la description des altitudes maximale et moyenne et à l'établissement de courbes représentant la distribution de la surface d'un bassin en fonction de l'altitude, mais aujourd'hui, l'orométrie et le champ de morphométrie plus vaste impliquent beaucoup plus large des indices.

II.2.3.1. Carte hypsométrique

Cette carte hypsométrique est un outil important pour comprendre la topographie du bassin versant et ses implications hydrologiques, comme les écoulements de surface, les zones d'accumulation, etc. Nous avons représenté les surfaces comprises entre les courbes de niveau de la carte hypsométrique par des couleurs différentes (*Figure 11*).

Le bassin versant de l'oued Amtar se caractérise par un relief extrêmement accidenté, avec des altitudes variant de 0 à plus de 2000 mètres. La carte met clairement en évidence cette topographie complexe, grâce à l'utilisation d'une échelle de couleurs reflétant les différentes classes d'altitude. Dans la partie nord-ouest du bassin, on observe les plus hauts sommets, représentés par les teintes jaunes, oranges et rouges, atteignant des altitudes comprises entre 1200 et 2100 mètres. Cette zone montagneuse abrupte contraste avec la partie sud-est, où les zones de basse altitude, de 0 à 400 mètres, dominent, figurées par les couleurs bleues et vertes claires.

Entre ces deux extrêmes, on distingue une succession de gradients altitudinaux, avec des zones intermédiaires s'étalant de 400 à 1200 mètres d'altitude, représentées par des nuances de vert. Cette forte variabilité altimétrique sur de courtes distances témoigne de la grande complexité géomorphologique de ce bassin versant.

La carte hypsométrique du bassin versant de l'oued Amtar révèle des informations importantes concernant les processus d'érosion et de glissements de terrain dans cette région montagneuse. Le relief extrêmement accidenté, avec des dénivelés importants sur de courtes distances, est un facteur favorisant l'érosion et les mouvements de terrain (Benzougagh et al., 2020 ; Bammou et al., 2024). Les fortes pentes, caractéristiques des zones d'altitude élevée, sont particulièrement propices au ruissellement concentré, à l'érosion hydrique et aux glissements de terrain. De plus, les transitions abruptes entre les différentes classes d'altitude indiquent la présence probable de failles, de fractures et de zones de

faiblesse géologique, qui peuvent constituer des plans de glissement potentiels pour les mouvements de terrain.

Par ailleurs, les zones de basse altitude, correspondent généralement à des secteurs de dépôt, où les sédiments érodés des parties hautes viennent s'accumuler. Ces zones peuvent être sujettes à des phénomènes d'alluvionnement, de coulées boueuses, des plaines d'inondation et de laves torrentielles, en fonction des conditions hydrologiques et météorologiques.

Ainsi, l'analyse détaillée de cette carte hypsométrique permet d'identifier les secteurs les plus sensibles aux processus érosifs et aux instabilités de terrain, ce qui est essentiel pour la gestion des risques naturels et l'aménagement du territoire dans cette région.

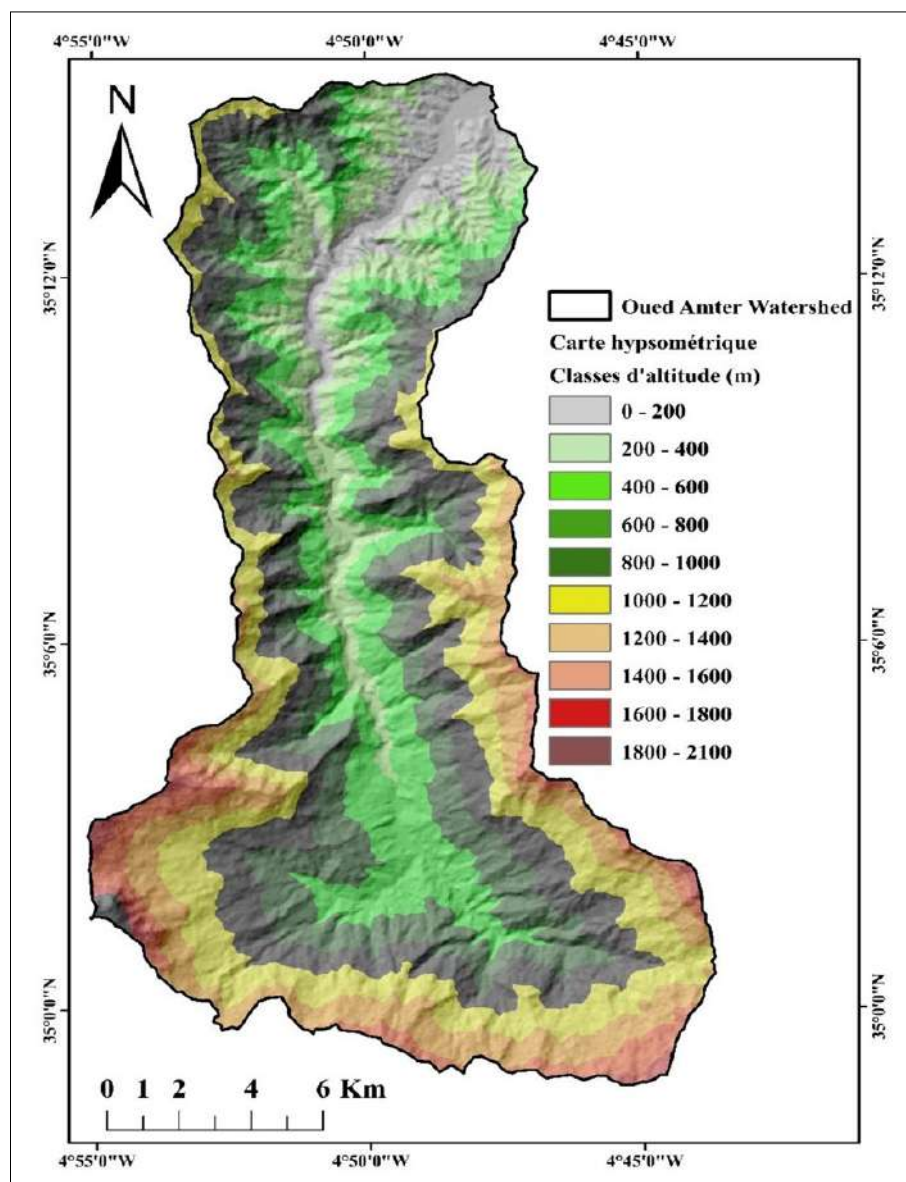


Figure 11 : Carte hypsométrique du bassin versant de l'oued Amtar

II.2.3.2. Courbe hypsométrique

La carte hypsométrique du bassin versant de l'oued Amtar peut également être utilisée pour construire une courbe hypsométrique, qui fournit des informations supplémentaires sur les caractéristiques du relief. La courbe hypsométrique est un graphique qui représente la surface cumulée du bassin en fonction de l'altitude. Elle permet d'analyser la distribution des surfaces en fonction de l'élévation et de caractériser la maturité du relief (*Tableau 2*).

Tableau 2 : fréquences et pourcentages cumulés de la surface du bassin versant

Classe d'altitude	Surface	%	Surface	% Surface
0 – 200	24	8	304	100

200 – 400	39	13	280,5	92
400 – 600	49	16,3	241,5	79
600 – 800	52	17,3	192,5	62
800 – 1000	55	18,3	140,5	45
1000 – 1200	48	16	85,5	27
1200 – 1400	21	7	37,5	11
1400 – 1600	11	3,66	26,5	4
1600 – 1800	4	1,33	22,5	3
1800 – 2100	1,5	0,5	21	2
Total	300	101,39	0	0

La courbe hypsométrique de ce bassin versant présente une forme concave, ce qui indique un relief relativement mature (*Figure 12 & Figure 13*). Ce profil suggère un équilibre entre les processus d'érosion et de soulèvement tectonique qui ont façonné le paysage au fil du temps.

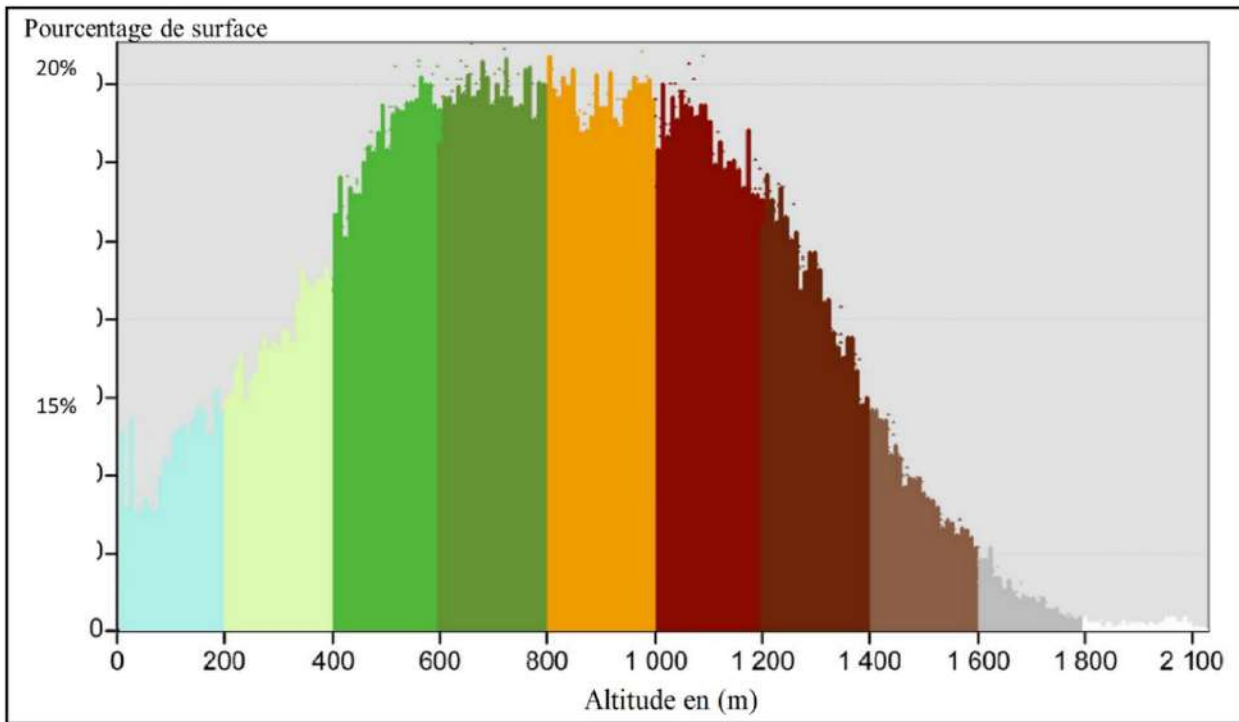


Figure 12 : Répartition de la surface totale en fonction d'altitude du bassin versant de l'oued Amtar

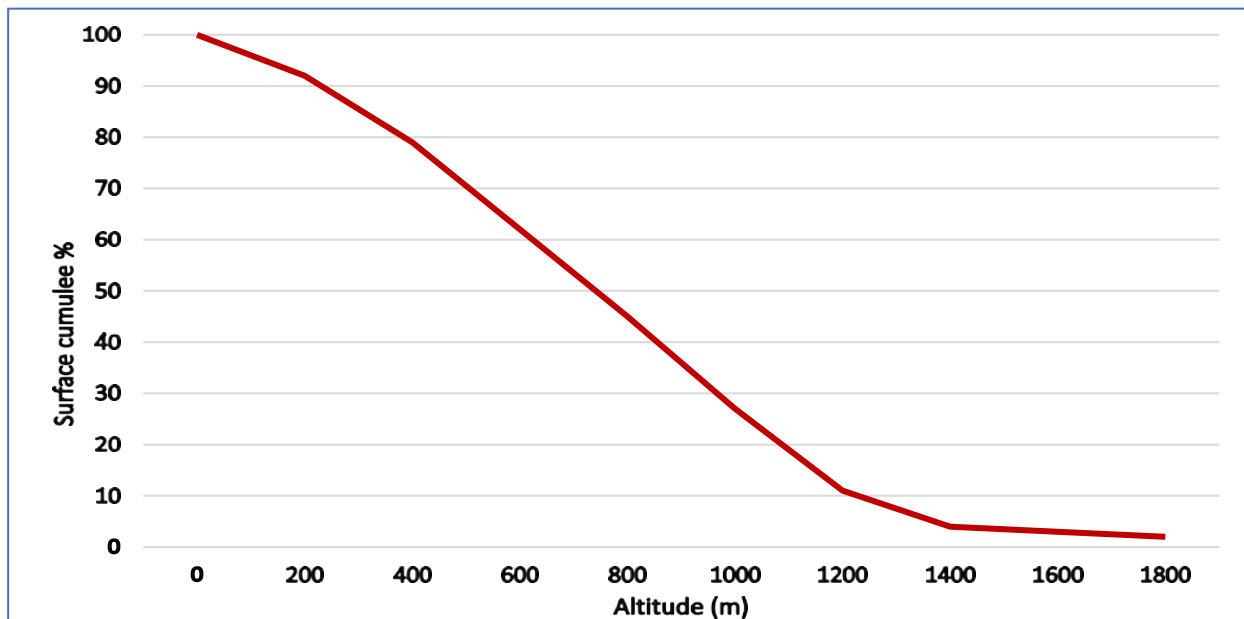


Figure 13 : Courbe hypsométrique du bassin versant de l'oued Amtar

II.2.3.3. Le rectangle équivalent

Le rectangle équivalent est un outil graphique dérivé de la courbe hypsométrique d'un bassin versant. Il permet de résumer de manière synthétique les principales caractéristiques du relief de ce bassin (Roche, 1963). Pour construire le rectangle équivalent, il faut tout d'abord calculer la surface totale du bassin versant représentée par la courbe hypsométrique. Cette surface correspond à l'aire sous la courbe.

Ensuite, il faut identifier l'altitude médiane, c'est-à-dire l'altitude pour laquelle 50% de la surface totale est atteinte. Cette altitude médiane sera la hauteur du rectangle équivalent. Le rectangle équivalent aura alors une largeur correspondant à 100% de la surface totale du bassin versant, et une hauteur égale à l'altitude médiane identifiée précédemment.

Les dimensions du rectangle équivalent sont déterminées par la formule suivante :

$$L = \frac{KG \cdot \sqrt{A}}{1.12} \times \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{KG} \right)^2} \right] \text{ Et } l = \frac{KG \cdot \sqrt{A}}{1.12} \times \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{KG} \right)^2} \right]$$

Avec :

- **KG** : indice de compacité de Gravelius.
- **A** : superficie de bassin versant (Km²).
- **L** : longueur du rectangle équivalent (Km).
- **l** : largeur du rectangle équivalent (Km).

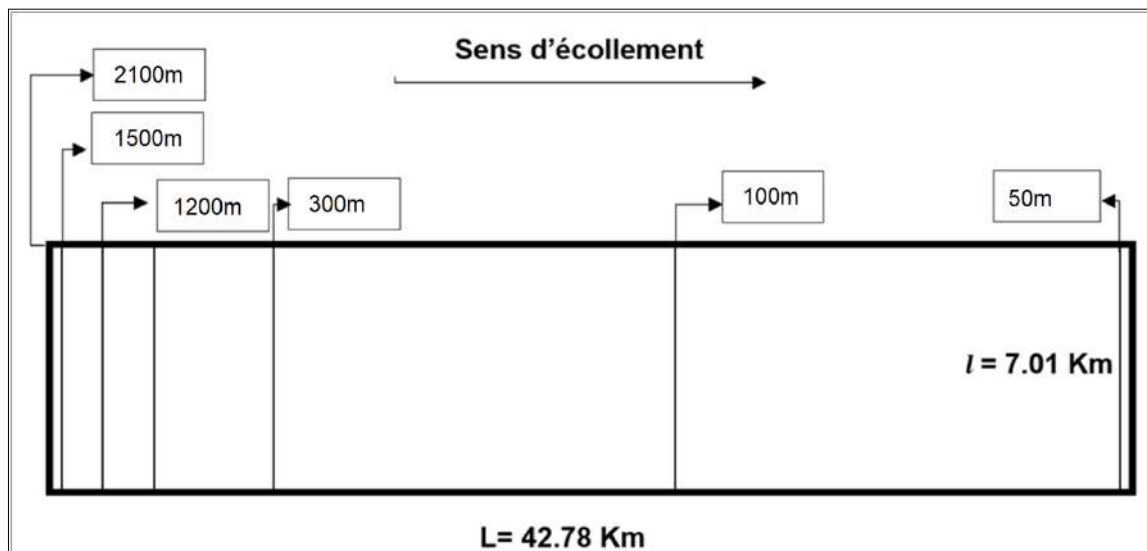


Figure 14 : Rectangle équivalent du bassin versant de l'oued Amtar

Pour le bassin versant de l'oued Amtar : $L = 42.78 \text{ Km}$ et $l = 7.01 \text{ Km}$, on note que la longueur est presque six fois plus grande que la largeur. Ce paramètre confirme la forme allongée de ce bassin versant. Ce rectangle a exactement la même surface que la zone sous la courbe hypsométrique, d'où son appellation de « rectangle équivalent ». Il permet de résumer graphiquement les principales caractéristiques du relief du bassin versant (*Figure 14*).

La largeur du rectangle représente la superficie totale du bassin, tandis que sa hauteur indique l'altitude médiane, communiquant une information sur l'élévation moyenne des terrains. L'analyse comparative de la courbe hypsométrique et de son rectangle équivalent fournit des renseignements intéressants sur la maturité du relief et la répartition des surfaces en fonction de l'altitude dans ce bassin versant.

II.2.3.4. Les caractéristiques d'altitudes

II.2.3.4.1. Altitudes minimales et maximales

Elles sont directement obtenues à partir des cartes topographiques. L'altitude maximale représente le point le plus élevé tandis que l'altitude minimale indique le point le plus bas où se trouve généralement l'exutoire. Dans notre cas étude, on a obtenu : altitude minimale : 0 m, et l'altitude maximale : 2100 m (Jebel Tizirane).

La différence entre l'altitude maximale (2100 m) et l'altitude minimale (0 m) au niveau de la mer donne un dénivelé total de 2100 m pour ce bassin versant. Cet important dénivelé témoigne d'un relief montagneux et accidenté au sein du bassin de l'oued Amtar. Cette importante différence d'altitude entraîne des conséquences significatives sur les processus d'érosion hydrique et les mouvements de terrain dans ce bassin.

Concernant l'érosion hydrique, le fort dénivelé indique que le réseau hydrographique est probablement très encaissé, favorisant une érosion régressive importante. Les écoulements concentrés dans les talwegs ont une énergie élevée, ce qui accentue l'arrachement et le transport solide. L'altitude minimale de 0 m suggère que le cours d'eau principal a atteint un niveau de base local, ce qui renforce encore les processus d'érosion.

En ce qui concerne les mouvements de terrain, le relief accidenté, avec des pentes fortes, est propice aux phénomènes de glissements, d'éboulements et de coulées boueuses. Les variations brutales d'altitude peuvent fragiliser les versants et déstabiliser les formations superficielles. Les zones de fortes pentes, notamment près des sommets, sont plus susceptibles d'être affectées par ces processus gravitaires. De plus, l'alternance de niveaux géologiques de dureté variable peut également favoriser les instabilités de terrain.

II.2.3.4.2. Altitude moyenne

L'altitude moyenne du bassin versant de l'oued Amtar est estimée à environ 1600 mètres. Cette valeur est déduite des informations fournies sur l'altitude médiane et le rectangle équivalent de ce bassin. En effet, le rectangle équivalent à une hauteur égale à l'altitude médiane de 1600 mètres. Cela

signifie que la moitié de la superficie du bassin versant se trouve au-dessus de cette altitude médiane, et l'autre moitié en dessous.

Ainsi, on peut considérer que l'altitude moyenne du bassin est très proche de cette altitude médiane de 1600 mètres. Cette méthode d'estimation de l'altitude moyenne à partir du rectangle équivalent est couramment utilisée pour les bassins versants, car elle permet de prendre en compte la répartition altimétrique de la surface du bassin.

Par ailleurs, le calcul classique de la moyenne arithmétique entre l'altitude minimale (0 mètres) et l'altitude maximale (2100 mètres) donnerait une altitude moyenne de 1057,5 mètres. Cependant, cette valeur ne reflète pas de manière précise l'altitude moyenne réelle du bassin, du fait du relief très accidenté.

II.2.3.4.3. Altitude médiane

La médiane est une mesure de tendance centrale qui partage la distribution des altitudes en deux parties égales. Cela signifie que 50% de la superficie du bassin se trouve au-dessus de cette altitude médiane de 1600 mètres, et 50% en dessous. L'altitude médiane est souvent utilisée pour caractériser le relief d'un bassin versant, car elle donne une indication de l'élévation centrale, en gommant l'influence des valeurs extrêmes (altitude minimale et maximale).

Dans le cas du bassin versant de l'oued Amtar, l'altitude médiane de 1600 mètres indique que la majorité du relief se situe autour de cette valeur centrale, avec une répartition équilibrée des surfaces au-dessus et en dessous. Cette information sur l'altitude médiane, combinée aux données sur l'altitude minimale (0 m) et maximale (2100 m), permet d'avoir une bonne compréhension du profil altimétrique général du bassin versant. Elle fournit des indications importantes sur les dynamiques érosives et les instabilités de terrain susceptibles de s'y produire.

Ce relief montagneux, caractérisé par cette altitude médiane élevée, est propice à une érosion hydrique importante. Les fortes pentes favorisent le ruissellement et le transport sédimentaire, entraînant la formation de ravines, de glissements de terrain et un transfert conséquent de matériaux. La couverture végétale joue alors un rôle essentiel pour limiter ces processus érosifs.

Par ailleurs, les versants abrupts liés à cette altitude médiane élevée rendent le bassin versant particulièrement sensible aux mouvements de terrain. Glissements, éboulements et coulées de boue peuvent se produire, notamment lors d'épisodes pluvieux importants ou d'alternances gel/dégel qui déstabilisent les pentes. La nature géologique du substrat influence également la propension à ces phénomènes d'instabilité.

Ces contraintes topographiques fortes, traduites par l'altitude médiane de 1600 mètres, impliquent des enjeux majeurs en termes d'aménagement du territoire. Des mesures de stabilisation des pentes et de protection contre les risques naturels doivent être envisagées pour sécuriser les zones habitées et les activités humaines dans ce bassin versant.

II.2.3.5. Etude de la pente

L'étude de la pente est un paramètre clé pour comprendre la dynamique géomorphologique de bassin versant de l'oued Amtar, dont l'altitude médiane s'élève à 1600 mètres. L'analyse de la répartition spatiale des pentes permettrait d'identifier les zones les plus pentues, susceptibles d'être soumises à une forte érosion hydrique et à des mouvements de terrain. La détermination des valeurs moyennes et maximales des pentes renseignerait sur le degré général d'accidentalité du relief et les secteurs les plus abrupts.

De plus, l'étude de la relation entre l'altitude et la pente confirmerait que les pentes les plus fortes se situent dans les parties les plus élevées du bassin, au-delà de l'altitude médiane de 1600 mètres. Cette analyse approfondie permettrait de mieux comprendre l'influence de la pente sur les processus géomorphologiques, comme le ruissellement, l'érosion hydrique et la stabilité des versants.

La connaissance fine de la répartition (*Tableau 3*) et des valeurs de pente est en effet essentielle pour adapter l'aménagement du territoire et mettre en place des mesures de protection contre les risques naturels dans ce contexte de relief montagneux. L'étude de la pente, en lien avec l'altitude médiane de 1600 mètres, constitue donc un préalable indispensable à une gestion durable et sécuritaire du bassin versant de l'oued Amtar.

Tableau 3 : Répartition des classes des pentes du bassin versant de l'oued Amtar.

Classes	Valeurs des classes	Surface en (%)	Surface en (Km ²)
Nulle	0 – 10	10,36	29,67
Faible	18 – 22	23,19	66,40
Modérée	18 – 22	25,71	73,60
Forte	23 – 28	20,66	59,14
Très Forte	29 – 35	14,42	41,29
Extrême	36 – 59	5,66	16,19

Ce tableau présente une répartition détaillée des différentes classes de pente à l'échelle du bassin versant. On constate que les pentes les plus douces, qualifiées de Nulle (0-10%) et de faible (18-22%), couvrent près de 35% de la superficie totale. Les pentes modérées (18-22%) et fortes (23-28%) sont les

plus répandues, occupant ensemble près de 45% du bassin. Les pentes les plus abruptes, classées très fortes (29-35%) et extrêmes (36-59%), représentent environ 20% de la superficie. Ces secteurs très pentus sont particulièrement sensibles aux processus d'érosion accélérée et aux mouvements de terrain (*Figure 15*).

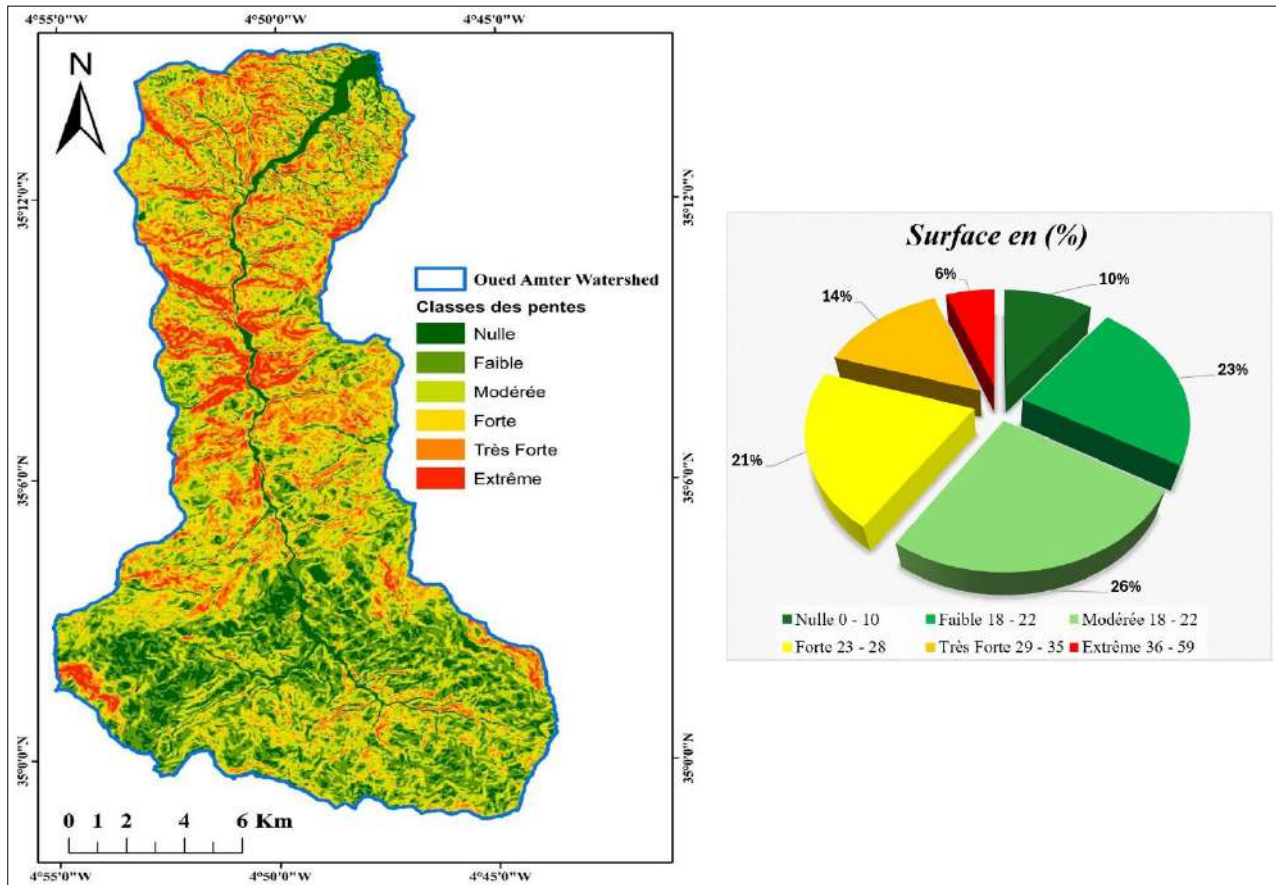


Figure 15 : Carte de répartition des pentes du bassin versant de l'oued Amtar

II.2.3.5.1. Pente moyenne du bassin versant

L'objectif principal du calcul de la pente moyenne d'un bassin versant est d'obtenir une caractérisation globale de la topographie de cette unité géomorphologique. Cette information est très importante pour plusieurs raisons :

- (i) Gestion des eaux et des risques naturels : La pente moyenne permet d'évaluer la dynamique d'écoulement des eaux de ruissellement et le risque d'érosion hydrique. Elle renseigne sur la vulnérabilité du bassin aux crues, aux glissements de terrain et autres phénomènes géomorphologiques. Cette connaissance est cruciale pour mettre en place des mesures de gestion durable des ressources en eau et de prévention des risques naturels.
- (ii) Aménagement du territoire : La pente moyenne est un paramètre essentiel pour planifier l'occupation des sols, les infrastructures et les activités économiques de manière adaptée. Elle

guide les choix d'implantation des constructions, des voies de communication, des zones agricoles, etc.

- (iii) Études environnementales : La pente moyenne influe sur les processus hydrologiques, pédologiques et écologiques au sein du bassin versant. Cette information permet de mieux comprendre et modéliser les dynamiques naturelles du milieu.
- (iv) Suivi et évaluation des changements : L'évolution de la pente moyenne dans le temps peut révéler des transformations du paysage (déforestation, érosion, etc.). Cela aide à évaluer l'impact des activités humaines et des changements environnementaux sur la topographie du bassin.

Le calcul de la pente moyenne est effectué selon l'équation suivante :

$$P_{moy} = \frac{\Delta H}{L} = \frac{H_{max} - H_{min}}{L}$$

Avec :

- **P_{moy}** : La pente moyenne du bassin versant,
- **Δ H** : L'altitude moyenne (m),
- **L** : La longueur du rectangle équivalent (Km),

D'après l'équation ci-dessus la pente moyenne du bassin versant d'oued Amtar est 16.66 m/km, c'est-à-dire elle est égale à 0,16%, ce qui signifie que le relief est fort selon la classification du relief donné par l'ORSTOM, pour confirmer cette information on va calculer l'indice de pente global (Ig).

II.2.3.5.2. Indice de pente global (Ig)

L'indice de pente global (Ig) est un autre paramètre utilisé pour caractériser la topographie d'un bassin versant, en complément de la pente moyenne. L'indice de pente global se calcule selon la formule suivante :

$$Ig = (H_{max} - H_{min}) / L$$

Avec :

- **H_{max}** : est l'altitude maximale du bassin versant (en m)
- **H_{min}** : est l'altitude minimale du bassin versant (en m)
- **L** : est la longueur totale du bassin versant (en m).

Cet indice permet d'évaluer la déclivité générale du bassin, en tenant compte de la différence d'altitude entre le point le plus haut et le point le plus bas, rapportée à la longueur totale du bassin.

L'intérêt de l'indice de pente global est qu'il donne une vision synthétique de la topographie, contrairement à la pente moyenne qui peut masquer certaines variations locales plus importantes.

En effet, la pente moyenne peut rester modérée même si le bassin présente des dénivelés significatifs dans certaines parties. L'indice de pente global permet alors de mieux appréhender ces contrastes.

Comme pour la pente moyenne, la connaissance de l'indice de pente global est essentielle pour : évaluer la dynamique des écoulements et les risques d'érosion ; orienter l'aménagement du territoire de manière adaptée ; comprendre le fonctionnement hydro-géomorphologique du bassin et suivre les évolutions topographiques dans le temps.

Le calcul de cet indice, effectué par l'équation suivante :

$$Ig = \frac{H_{5\%} - H_{95\%}}{L_{eq}}$$

Avec :

- **Ig** : Indice de pente global en m /km,
- **L_{eq}** : Longueur du rectangle équivalent (Km),
- **H5%** : Altitude correspondant à 5 % de la surface totale du bassin versant,
- **H95%** : Altitude correspond à 95 % de la surface totale du bassin versant.

L'indice de pente globale (Ig) du bassin versant de l'oued Amtar est de 28,05 m/km, soit 0,28%. Selon la classification du relief proposée par l'ORSTOM (Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer), ([Tableau 4](#)), une valeur d'Ig comprise entre 20 et 50 m/km correspond à un relief qualifié de « **fort** ». Par conséquent, la valeur de l'indice de pente globale de 28,05 m/km pour le bassin versant d'oued Amtar indique que le relief de ce bassin est de type « fort », d'après la grille de classification de l'ORSTOM.

Cette information sur la nature « forte » du relief du bassin est importante, car elle renseigne sur la dynamique des écoulements, les risques d'érosion hydrique, le mouvement de terrain, et les contraintes potentielles pour l'aménagement de ce territoire.

Tableau 4 : Classification du relief selon Ig donné par l'ORSTOM

Type de relief	Valeur d'Ig
Relief très faible	$Ig < 0,002$
Relief faible	$0.002 \leq Ig < 0,005$

Relief assez faible	$0,005 \leq I_g < 0,01$
Relief modéré	$0,01 \leq I_g < 0,02$
Relief assez fort	$0,02 \leq I_g < 0,05$
Relief fort	$0,05 \leq I_g < 0,5$
Relief très fort	$I_g > 0,5$

II.2.3.6. Cadre Hydrographique

Le réseau hydrographique d'un bassin versant désigne l'ensemble des cours d'eau, rivières, ruisseaux et autres écoulements qui drainent les eaux de ce bassin. Il constitue un élément essentiel pour caractériser le fonctionnement hydrologique du bassin.

Les principaux éléments du réseau hydrographique sont : (i) Cours d'eau principal : il s'agit de la rivière ou du fleuve qui collecte les eaux du bassin. Son parcours, sa sinuosité, son débit sont des indicateurs importants. (ii) Affluents et sous-bassins : les affluents sont les cours d'eau secondaires qui se jettent dans le cours d'eau principal. Ils délimitent des sous-bassins versants au sein du bassin principal. La densité, la taille et l'organisation des affluents renseignent sur la structure du réseau. (iii) Réseau de drainage : ce sont les multiples petits ruisseaux et talwegs qui convergent vers les affluents. Leur densité, leur longueur et leur configuration révèlent l'efficacité du drainage du bassin. (iv) Plans d'eau : lacs, étangs et zones humides font aussi partie intégrante du réseau hydrographique. Ils jouent un rôle de régulation des écoulements.

L'analyse approfondie du réseau hydrographique d'un bassin versant revêt une importance cruciale, car elle permet d'évaluer plusieurs aspects essentiels de son fonctionnement. Elle renseigne sur la dynamique des écoulements, en termes de régime (permanence, intermittence des cours d'eau), de crues éventuelles et de périodes d'étiage. Ces informations sont primordiales pour comprendre la disponibilité en eau et les risques associés.

L'étude du réseau hydrographique permet également d'identifier les zones de concentration des eaux, qui sont susceptibles de connaître des phénomènes d'inondation en période de fortes pluies. Cette connaissance est fondamentale pour évaluer les risques et mettre en place des aménagements adaptés.

Par ailleurs, l'analyse du réseau renseigne sur les processus d'érosion et de transport solide qui affectent le bassin. La configuration des cours d'eau, leur pente et leur dynamique influencent directement ces phénomènes, essentiels pour comprendre l'évolution du milieu. De plus, l'inventaire des différents éléments du réseau hydrographique (cours d'eau, plans d'eau, zones humides) permet d'estimer le potentiel en ressources en eau du bassin, que ce soit pour les usages domestiques, agricoles ou industriels.

Enfin, l'analyse du réseau hydrographique renseigne sur l'impact des activités humaines sur le milieu aquatique. Les aménagements, les prélèvements, les pollutions peuvent en effet modifier de manière substantielle le fonctionnement de ce réseau.

Globalement, l'étude approfondie du réseau hydrographique d'un bassin versant est une étape incontournable pour en comprendre le fonctionnement global et en évaluer les enjeux de gestion des ressources en eau et des risques associés.

L'analyse du réseau hydrographique du bassin versant de l'oued Amtar, à partir des éléments observés sur la carte (*Figure 16*) : L'examen approfondi de la carte du réseau hydrographique du bassin versant de l'oued Amtar révèle une structure complexe et ramifiée des écoulements. Le cours d'eau principal, l'oued Amtar, collecte les eaux d'un vaste réseau de tributaires et de sous-bassins versants, témoignant d'une bonne capacité d'évacuation des flux hydriques.

La classification des cours d'eau en 6 ordres, des plus petits ruisseaux aux axes principaux, permet d'analyser la hiérarchie de ce réseau de drainage. Cette organisation hiérarchique est un élément crucial pour comprendre la dynamique des écoulements, les zones de concentration des eaux et les risques d'inondation potentiels au sein du bassin.

De plus, l'absence de plans d'eau majeurs indiqués sur la carte suggère que le potentiel en ressources en eau du bassin repose principalement sur les écoulements de surface. Cependant, une analyse complémentaire serait nécessaire pour évaluer plus finement les processus d'érosion, de transport solide et l'impact des activités humaines sur ce milieu aquatique.

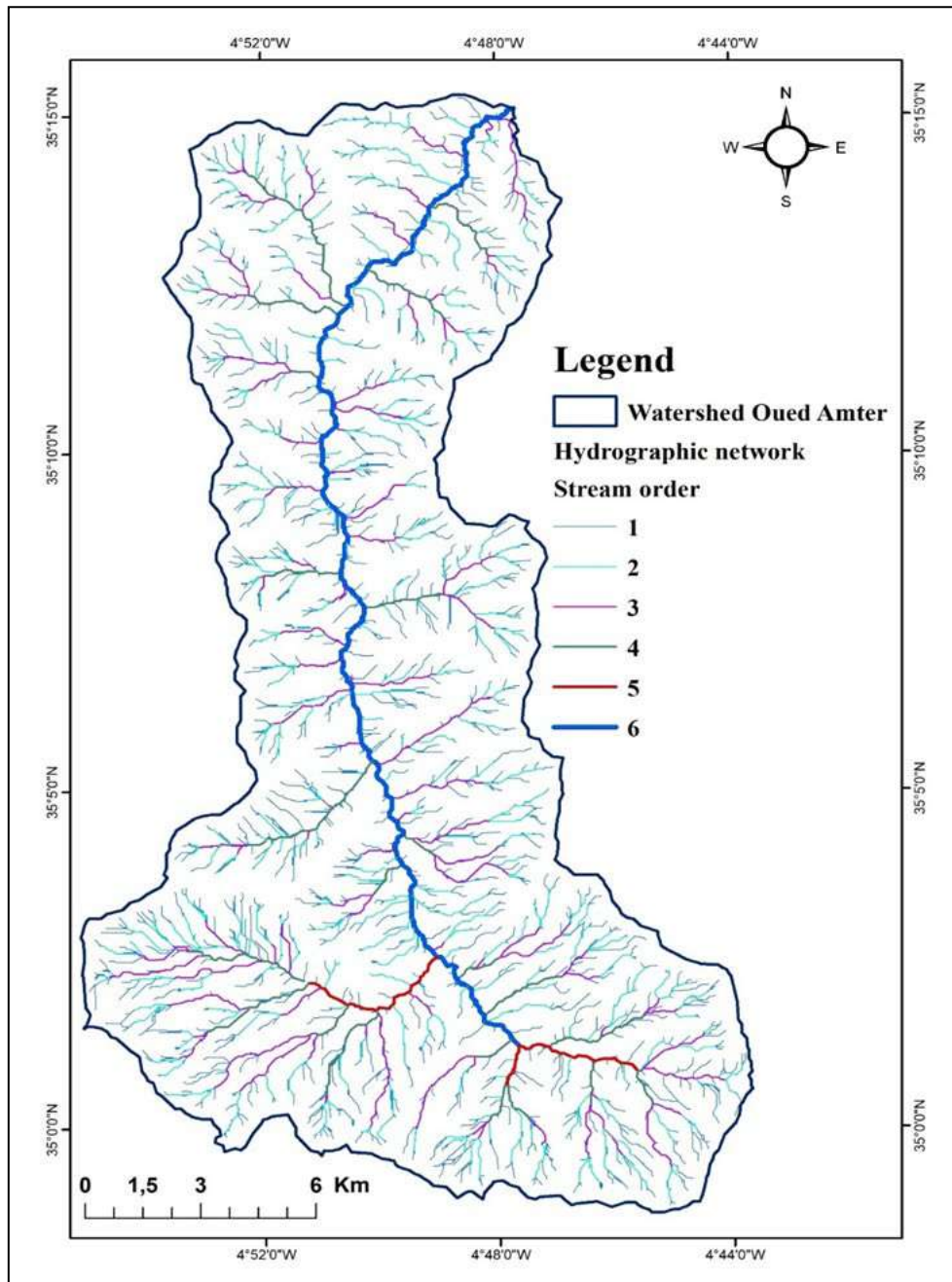


Figure 16 : Carte d'agencement du réseau hydrographique du bassin versant d'oued Amtar en ordres

II.2.3.7. Densité de drainage

L'analyse de la densité du réseau de drainage dans le bassin versant de l'oued Amtar apporte des informations complémentaires sur le fonctionnement hydrologique de ce territoire. On observe que le réseau hydrographique est très développé et dense sur l'ensemble du bassin. La présence de nombreux cours d'eau, ruisseaux et écoulements, y compris de petit ordre (1 à 3), indique une forte capacité d'infiltration et de drainage des eaux au sein du bassin.

Cette densité de drainage élevée peut s'expliquer par plusieurs facteurs : (i) la nature du sol et du sous-sol : la géologie et la pédologie du bassin, avec par exemple des formations imperméables ou

Évaluation des risques d'érosion de surface et profonde à oued Amtar (Rif, Maroc)
Apport des outils géomatiques et de machine Learning

un relief accidenté, favorisent le ruissellement et l'érosion, entraînant la formation d'un réseau hydrographique dense. (ii) le climat local : des précipitations abondantes et/ou un régime pluviométrique irrégulier peuvent accentuer les phénomènes de ruissellement et d'érosion, contribuant à la densification du réseau. (iii) l'occupation des sols : une végétation peu développée ou des activités humaines intensives (déforestation, urbanisation, etc.) peuvent également altérer les processus d'infiltration et accélérer la concentration des eaux de surface.

Cette forte densité de drainage indique que le bassin de l'oued Amtar présente une bonne réactivité hydrologique aux événements pluviométriques. Cependant, elle peut aussi être le signe d'une fragilité du milieu face aux risques d'érosion, de glissement de terrain et de crues rapides.

La densité de drainage (Dd) se définit comme la somme des longueurs de tous les réseaux hydrographiques divisée par la superficie du bassin versant, selon la relation suivante :

$$Dd = \Sigma \text{ longueurs des cours d'eau (L)} / \text{superficie du bassin (A)}$$

- Avec :
- **Dd** : densité du drainage (km/km^2).
- **L** : longueur totale des cours d'eau (km).
- **A** : superficie totale du bassin (km^2).

Selon les données fournies, la longueur totale du réseau principal s'élève à environ 130 km, pour une superficie totale du bassin de 300 km^2 . Ainsi, la densité de drainage du bassin de l'oued Amtar être calculée comme suit : $Dd = 130 \text{ km} / 300 \text{ km}^2 = 0,43 \text{ km}^{-1}$ Cette valeur de densité de drainage de $0,43 \text{ km}^{-1}$ indique un réseau hydrographique très développé et dense sur l'ensemble du bassin versant de l'oued Amtar.

Comme évoqué précédemment, cette forte densité de drainage traduit une bonne capacité d'infiltration et d'évacuation des eaux au sein du bassin. Elle peut s'expliquer par des facteurs tels que la nature imperméable des sols, un relief accidenté, un climat pluviométrique abondant ou une occupation des terres peu favorable à l'infiltration (enquêtes sur terrain).

II.2.3.8. Cadre géomorphologique

Le bassin versant de l'oued Amtar se caractérise par un relief extrêmement accidenté et contrasté. Les altitudes varient grandement, allant de quelques centaines de mètres dans les vallées encaissées à plus de 2 000 mètres sur les sommets les plus élevés (Jbel Tizirane). Ce paysage montagneux abrupt est le résultat de processus tectoniques et érosifs intenses qui ont façonné cette région (Mastere, 2011). Le relief est fortement compartimenté, suite au morcellement d'une structure complexe de nappes charriées vers le sud. Les effets de la tectonique se font encore sentir aujourd'hui,

et l'érosion a fortement façonné les versants, en particulier dans les séries marno-schisteuses épaisses. On y observe ainsi une grande diversité de formes d'érosion (Maurer, 1970).

Dans la partie centrale, la solifluction a notamment joué un rôle important en estompant une bonne partie des héritages géomorphologiques. Le long du littoral méditerranéen, surtout à l'Est, de belles coupes géologiques permettent d'observer les relations complexes entre les niveaux marins et les séries de glacis et terrasses continentales des basses vallées.

Gérard Maurer (1970), a réalisé une étude géomorphologique très détaillée de cette région difficile d'accès, aux routes rares, et marquée par les enjeux de la décolonisation française et espagnole. Son travail s'appuie sur une cartographie géomorphologique en couleurs de grande qualité, qui devient une référence pour la compréhension des processus d'érosion méditerranéenne (*Figure 17*).

Après avoir décrit le cadre physique général, l'auteur analyse en détail la complexe structuration du Rif et de son avant-pays oriental, afin de reconstituer les grandes étapes de l'évolution géologique et géomorphologique. Il distingue ainsi plusieurs ensembles régionaux, comme les Basses Montagnes de l'Ouest qui ont conservé d'anciennes topographies et des séries de glacis et terrasses.

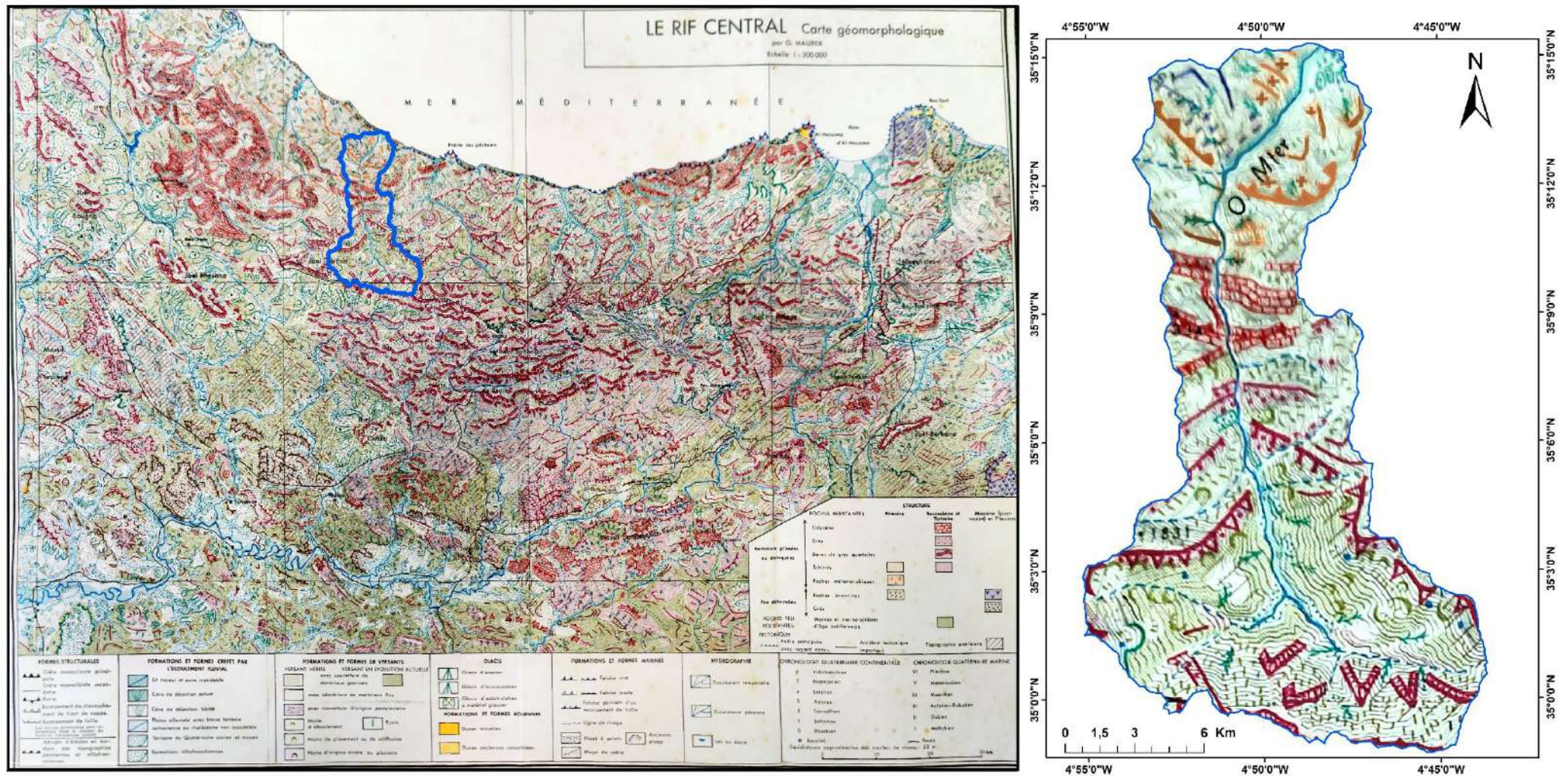


Figure 17 : Carte géomorphologique du Rif Central (Maurer, 1970)

II.2.3.9. Cadres géologiques

Le bassin versant d'oued Amtar s'étend le long du domaine Rifain interne. La géologie de ce bassin joue un rôle capital dans la circulation des eaux de surface et la genèse des risques naturels. Lorsque le bassin versant présente des formations géologiques très perméables, supportées par une couverture végétale dense, la densité de drainage tend à être faible. Cela s'explique par une infiltration importante des eaux dans le sol, plutôt que leur ruissellement en surface.

À l'inverse, si les formations géologiques du bassin versant sont imperméables et que la végétation y est moyenne, cela facilite grandement la circulation des eaux en surface. Dans ce cas, l'érosion et les glissements de terrain sont élevées, et la densité de drainage augmente de façon significative. Le ruissellement de surface devient alors plus important que l'infiltration, par conséquent, le bassin versant est exposé au risque d'inondation.

Ainsi, la perméabilité des formations géologiques et le degré de végétalisation du bassin versant sont des facteurs déterminants qui influencent l'équilibre entre l'infiltration des eaux dans le sol et leur ruissellement en surface. Ces paramètres géologiques et biologiques jouent donc un rôle essentiel dans la dynamique hydrique du bassin versant d'oued Amtar.

II.2.3.9.1. Généralités sur la chaîne du Rif

La chaîne du Rif située au Nord du Maroc fait partie du système alpin de la méditerranée occidentale. Elle se prolonge vers l'Est dans le Tell Algéro-Tunisien jusqu'en Sicile et en Calabre (sud de l'Algérie). Vers le Nord, on trouve sa prolongation dans les Cordillères Bétiques (Sud de l'Espagne). Du point de vue structurale le Rif est subdivisé en trois grands domaines. Ces trois domaines sont de l'intérieur vers l'extérieur : les zones internes, les nappes des flysch et les zones externes (*Figure 18*).

Les zones internes : Elles s'étendent le long de la côte méditerranéenne depuis Sebta jusqu'à Jebha, où elles disparaissent sous la mer, pour affleurer encore plus loin dans le massif des Bokoya à l'ouest d'Al Hoceima. Les zones internes du Rif constituées généralement par trois grands ensembles structuraux :

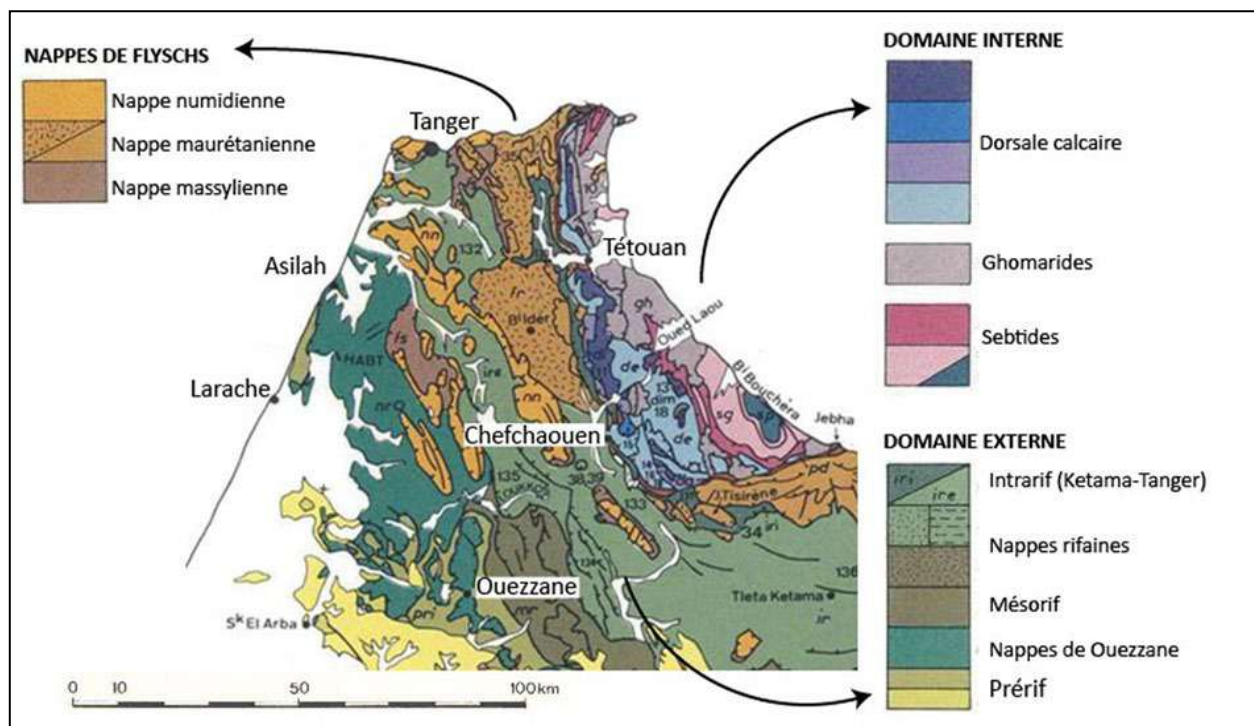


Figure 18 : Répartition des trois grands domaines géologiques rifains : Domaine Interne, Domaine Externe et Nappes de flyschs (Modifié de Wildi, 1983).

Les zones externes :

Les zones externes du Rif constituent une ceinture de nappes de charriages empilées et plissées. Dans le Rif septentrional, l'orientation générale de ces plis et chevauchements est nord-sud. Cependant, cette orientation évolue progressivement vers l'ouest-nord-ouest/est-sud-est, est/ouest et même est-nord-est/ouest-sud-ouest dans la partie méridionale de la chaîne rifaine.

La majorité de ces chevauchements présentent une vergence, c'est-à-dire une direction de déplacement, vers l'ouest dans le nord du Rif, puis vers le sud dans le sud du Rif. Ces zones externes sont composées de séries sédimentaires non métamorphiques depuis le Cénozoïque et occupent la partie la plus externe du système orogénique rifain. On distingue trois principales nappes au sein de ces zones externes : le Prérif, qui comprend les unités géologiques de Tanger et de Ketama, le Mésorif et l'Intrarif.

II.2.3.9.1.1. Domaine interne

Il constitue la marge de la Méditerranée actuelle (Figure 22) et dont la position paléogéographique correspondrait à la microplaque d'Alboran (Andrieux, 1971). Appelé aussi Rif interne, il est principalement développé au niveau de la péninsule de Tanger, où il se présente sous forme d'une bande continue le long de la côte méditerranéenne depuis Sebta jusqu'à l'accident de Jebha – Cherrafate sur lequel il s'arrête brutalement. Il est formé d'un ensemble de terrains allochtones : des terrains anciens poly-métamorphiques, des séries paléozoïques et des séries méso-cénozoïques, qui sont :

✓ Les Sebtides

Elles sont constituées d'un empilement de nappes paléozoïques à triasiques de 2 à 5 km d'épaisseur et présentant des gradients métamorphiques très différents. Ce sont les unités les plus profondes ([Figure 34](#)) ([Didon et al., 1973](#) ; [Durand Delga et Olivier, 1988](#)), équivalentes des Alpujarides de la chaîne bétique comprenant un socle pluri-métamorphique associé à des roches ultrabasiques. Ces dernières ont été interprétées par ces auteurs comme une écaille du manteau supérieur dont la remontée en surface s'est effectuée lors d'un processus d'extension lié à un amincissement crustal.

✓ Les Ghomarides

Elles sont formées d'un empilement de nappes paléozoïques de bas degrés de métamorphisme et de leur couverture sédimentaire non-métamorphique permo-triasique. Les Ghomarides reposent tectoniquement sur les différents niveaux des Sebtides ([Figure 18](#)). Elles reposent également sur la chaîne calcaire et par endroits même sur les nappes des flyschs en position plus externe ([Chalouan, 1986](#)). Les Ghomarides sont l'équivalent des Malaguides bétiques et constituées de terrains paléozoïques, mésozoïques et tertiaires ([Chalouane, 1986](#) ; [Durand Delga et Olivier, 1988](#)).

✓ La chaîne ou dorsale calcaire

Elle est constituée de carbonates cénozoïques à mésozoïques interprétés comme les sédiments des paléo-marges passives ibérique et africaine ([Chalouan, 1986](#)). La dorsale calcaire occupe la partie la plus externe du Rif interne ([Figure 34](#)). C'est un ensemble complexe constitué par de puissantes séries carbonatées du Trias supérieur-Lias réduites et allant jusqu'au Miocène inférieur ([Olivier 1981, 1982](#) ; [El Hatimi, 1982](#)). L'évolution de ces séries principalement au Trias et au Lias a permis de distinguer des zones paléogéographiques avec une dorsale interne, une dorsale externe et une dorsale médiane ([Didon et al., 1973](#) ; [Wildi, 1983](#)).

II.2.3.9.1.2. Domaine des nappes de flyschs

La zone des flysch : se situent entre les zones internes et externes. Sont constitués de séquences silico-clastiques du Jurassique supérieur au Burdigalien inférieur, issues du bassin de la Néotéthys qui était compris entre les marges ibérique et africaine. Les dépôts ont été alimentés par des sédiments issus des zones internes (principalement de la Dorsale Calcaire et des Ghomarides), preuve de l'émersion de ces unités. Ces flysch sont subdivisés en quatre séries de nappes : les nappes de Chaounat, Meloussa et Numidiennes (Flysch massylien) et les nappes de Tisirène et Béni-Ider (Flysch Mouritanien).

C'est un ensemble d'unités formées de séries de flyschs allochtones qui bordent à l'Ouest et au Sud la chaîne calcaire. Il est formé par des séries s'étageant du Crétacé à l'Aquitainien. Elles comportent quatre nappes, à savoir : nappe pré-dorsalienne, nappe maurétanienne, nappe massylienne et nappe numidienne.

✓ La nappe pré-dorsalienne

Constitue la partie externe de la dorsale calcaire. Elle correspondait à une zone de transition dont la signification géographique et structurale est sujette à de multiples interprétations. Cette unité a été également désignée comme l'unité de Belliounes (Durand Delga, 1972), la semelle tertiaire (Andrieux, 1971), l'unité de Béni Derkoul (Wildi et al., 1977) ou l'unité chaotique à klippes représentées par des dépôts re-sédimentés de calcaires et dolomies liasiques et des flyschs tertiaires (Durand Delga, 1963).

✓ La nappe mauritanienne

Définie en Algérie et représentée au Maroc par la nappe de Jbel Tizirène, d'âge Crétacé inférieur, et, la nappe de Beni-iddar d'âge Crétacé supérieur à l'Oligocène (Durand Delga et Mattauer, 1960). La nappe de Jbel Tizerene est dans l'ensemble comprise entre Bab Taza et les Bokkoya, elle constitue un immense affleurement de flysch. Par contre, au nord de Bab Taza et jusqu'à la parallèle de Tétouan, la nappe est réduite à des lambeaux dispersés. Plus au nord, la nappe s'étale plus largement entre la chaîne du Haouz et la région de Tanger pour apparaître enfin au bord du détroit de Gibraltar et former la Pointe de Cires. La nappe de J.Tizirène qui repose localement sur des radiolarites et des roches volcaniques (Chalouan et al., 2008), est formée par une série marno-calcaire d'âge Berriasien, surmontée par un ensemble de flyschs grésopélitique qui s'échelonne du Valanginien à l'Albien. Localement, la nappe de Tizirène est couverte en continuité stratigraphique par une formation cénomano-turonienne carbonatée associée à des minces niveaux phanériques (Olivier, 1981-1982 ; El Hatimi, 1982). La nappe de Beni-Idder est constituée par des terrains allant du Crétacé supérieur à l'Oligocène terminal / Miocène basal (Didon et al., 1973). Le Crétacé supérieur est essentiellement marneux, associé à des calcaires, parfois à silex, et, à intercalations gréseuses. L'Éocène est pélicarénitique, riche en bioclastes ; l'Oligocène est constitué par une puissante série grésomiacée carbonatée. La nappe de Beni-Idder constitue le complément stratigraphique de l'unité de J.Tizirène (Durand Delga et Olivier, 1988).

✓ La nappe massylienne

Définie en Algérie, elle correspond au Maroc à la nappe de Melloussa (Durand Delga 1980 ; Didon et al., 1973) et à son équivalent latéral, la nappe de Chouamate (Andrieux, 1971 ; Didon et al., 1973). Au niveau de la chaîne rifaine, cette nappe est constituée dans sa grande partie stratigraphique par un flysch grésopélitique d'âge albo-aptien surmonté par un Crétacé supérieur calcaropélitique d'âge cénomano-turonien (Durand Delga, 1963).

✓ La nappe numidienne

Le terme numidien a été proposé pour la première fois pour désigner une large séquence gréseuse affleurant le long de la côte algérienne. Ensuite, une série homologue était décrite dans la chaîne bétique

en lui donnant le nom « d'Arenisca d'Algibe » ; alors que ce n'est que récemment que des séries de grès numidiens ont été distinguées dans différents secteurs de la chaîne maghrébine et au Sud des Apennins (Durand Delga, 1963). De point de vue stratigraphie, les grès numidiens du Maroc ont été considérés pendant longtemps comme appartenant au Crétacé supérieur alors qu'au Nord du Détroit de Gibraltar « l'Arenisca d'Algibe » leur attribution à l'Oligocène est justifiée. Ce n'est donc qu'en 1960, que Durand Delga et Mattauer reconnaissent le grès numidien au Maroc, en lui attribuant un âge oligocène par analogie avec les grès numidiens d'Algérie.

Il s'agit d'un vaste domaine structural largement charrié par les nappes des flyschs allochtones et le domaine interne (Figure 22). Sa structure interne complexe traduit un dispositif paléogéographique qui correspondrait à la marge africaine de l'océan Téthysien (Durand- Delga et al., 1963 ; Lespinnasse, 1975). Le Rif externe est formé par des unités enracinées et des unités de décollement (*Figure 19*), qui sont, de l'intérieur vers l'extérieur de la chaîne : zone intrarifaine, la zone mésorifaine, et la zone préarifaine (Suter, 1980a – 1980b). Le socle paléozoïque n'est pas reconnu dans le Rif externe.

II.2.3.9.1.3. Zones Mésorifaine ou Mésorif

La zone Mésorifaine a été définie par Suter (1980a – 1980b) et elle est constituée de terrains allant du Lias au Miocène. Le Jurassique et le Crétacé sont les deux termes essentiels de la zone Mésorifaine (Asebriy et al., 1987). Celle-ci peut être subdivisée en deux sous-ensembles, le Mésorif interne et le Mésorif externe.

II.2.3.9.1.4. Zones préarifaines ou Pré-Rif

Le Pré-Rif forme la frange méridionale du domaine externe. Il est essentiellement représenté par des terrains à **faciès marneux** qui prédominent dès le Crétacé inférieur (Wildi 1983). Ainsi, on y distingue le Pré-Rif interne et le Pré-Rif externe.

II.2.3.9.1.5. Le Pré-Rif interne

Il est constitué d'écailles enracinées sous le Mésorif et caractérisé par ses terrains du Lias et du Dogger qui forment ce qu'on appelle le « sof ».

II.2.3.9.1.6. Le Pré-Rif externe

Caractérisé par des affleurements formés principalement, par une nappe de décollement à structure chaotique ; représentée par une matrice marneuse, elle aussi renferme des évaporites et d'autres éléments du Trias (Wildi, 1983).

II.2.3.9.1.7. L'avant pays (les unités décollées et glissées)

Nappe rifaine supérieure à affinité intra rifaine (Wildi, 1983) : Les unités supérieures à affinités intra rifaines sont toutes les séries allochtones superposées à l'unité de Ketama dont le Jurassique

détritique est semblable à celui de la nappe de Senhadja et la nappe d'Aknoul. Nappes rifaines à affinité Mésorifaine (Wildi, 1983). Nappes de type Ouezzane : on y trouve la nappe d'Ouezzane (sensu stricto) (1980a – 1980b), la nappe de Habt⁶ et l'unité de Tsoul qui est superposée au domaine prérfain (Le Blanc et Olivier, 1983). De point de vue stratigraphique ces nappes sont constituées de terrains allant du Crétacé au Miocène supérieur.

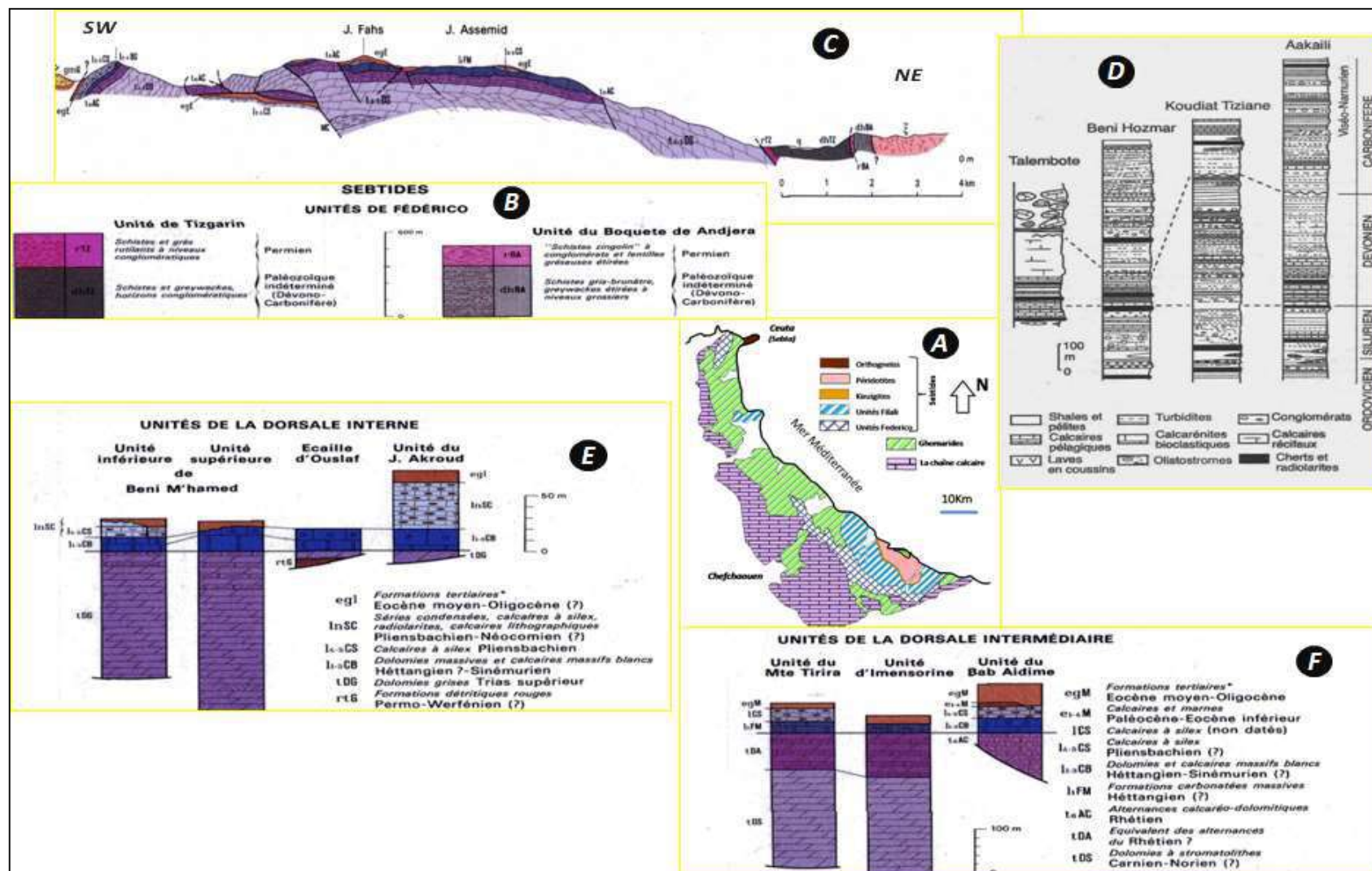


Figure 19 : (A) Schéma montrant les subdivisions du rif interne ; (B) Logs stratigraphiques des terrains Sebides ; (C) : coupe géologique montrant les relations structurales entre les différentes subdivisions du Rif interne (SGM, 1975) ; (D) : colonnes lithostratigraphiques

II.2.3.9.2. Cadre géologique du bassin versant de l'oued Amtar

Le Rif édifice montagneux de la partie septentrionale du Maroc, fait partie des chaînes alpines du pourtour de la Méditerranée occidentale, par son âge et son style. Il est constitué de terrains qui remontent au secondaire et au tertiaire, ils sont structurés en nappes de charriage et affectés par des failles essentiellement décrochantes (Durand-Delga, 1972). La chaîne Rifaine est formée par trois ensembles géologiques distincts : domaine interne, domaine des nappes de flyschs et domaine externe. La zone d'étude est constituée essentiellement par deux grandes unités (**Figure 20**) : les nappes de flysch et une partie du Rif interne. Les séries de flyschs comportant quatre principaux groupes d'unités à matériel flysch : (i) Nappe prédorsalienne : constitue la partie externe de la dorsale calcaire, elle correspond à un complexe chaotique à blocs constitués par une matrice marneuse Oligo-Miocène inférieur et des blocs resédimentés de nature et d'âges variés de calcaire dorsaliens et des grès micacés (Durand-Delga, 1972). (ii) Nappe mauritanienne : couvre l'intervalle large Jurassique supérieur – Miocène inférieur et englobe les deux séries du Tisirène et des Béni Ider. Elle préserve la continuité entre les deux grands corps gréseux qui la caractérisent dans les intervalles Barrémien – Albien (flysch gréseux fin du Tisirène) et Oligocène supérieur – Burdigalien inférieur (flysch gréso-micacé des Béni Ider), et ce en plusieurs endroits le long de la rive sud du détroit de Gibraltar et le long de l'oued El Kébir des Béni Ider (Durand-Delga et al., 1959). (iii) Nappe massylienne : Définie en Algérie, correspond au Maroc à la nappe de Mellossa. Elle est formée essentiellement par des flysch grés-pélique d'âge albo-aptien (Durand-Delga, 1965). (iv) Nappe numédienne : Définie en Algérie, elle est constituée par des argiles de base Oligocène et par un flysch d'âge Aquitano-burdigalien inférieur à une série gréseuse aquitanienne à dragées de quartz (Didon et al., 1984).

La partie littorale de la région est formée essentiellement de parties du domaine interne qui sont : (i) Les sebtides : sont les unités les plus profondes (Didon et al., 1973) à matériel infracrustal (péridotites), entourées de terrains métamorphiques de haut grade (kinzigites, gneiss) et de terrains sédimentaires affectés de métamorphisme. (ii) Les Ghomarides, terrains schisteux épi-métamorphiques hérités de la chaîne varisque, ils reposent tectoniquement sur les différents niveaux de sebtides (Chalouan, 1986).

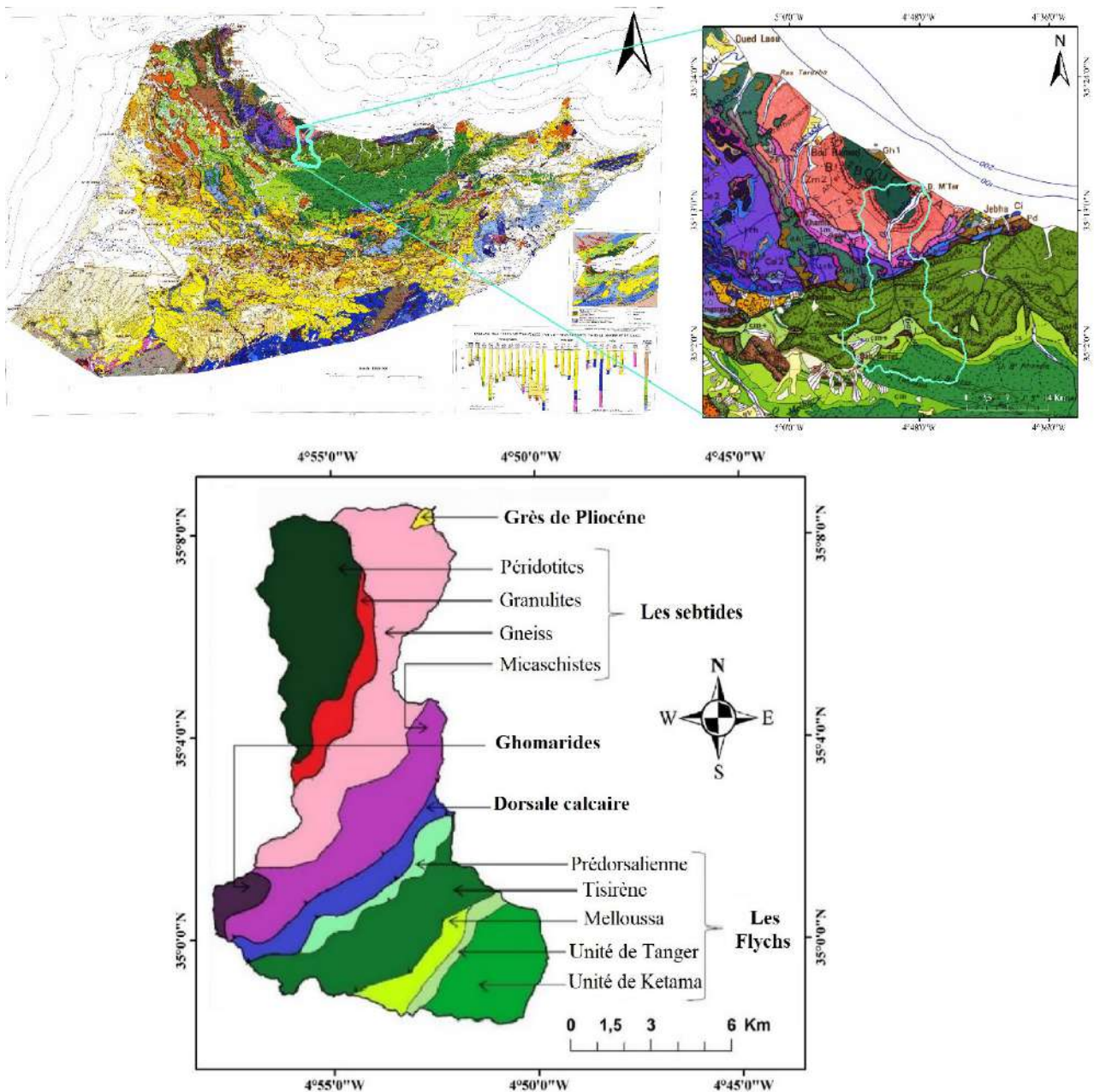


Figure 20 : Carte des faciès géologiques du bassin versant d'oued Amtar (El brahimi et al., 2023)

II.2.3.10. Cadre géomorphologique

Le bassin versant de l'oued Amtar s'inscrit dans le contexte géologique et structural complexe de la chaîne montagneuse du Rif, au nord du Maroc. Cette région se caractérise par une topographie fortement accidentée, témoignant de l'histoire tectonique mouvementée de cette portion de la chaîne alpine. Dans le détail, la partie amont du bassin versant est dominée par des reliefs montagneux particulièrement escarpés, avec des pentes abruptes et des vallées étroites et encaissées. Ces secteurs sont façonnés par une érosion hydrique marquée, avec de nombreux phénomènes de ravinement et d'instabilité des versants (glissements de terrain, éboulements rocheux).

Paysage, le modelé géomorphologique évolue progressivement vers des formes plus douces, avec un paysage de collines et de glacis colluviaux issus de l'érosion des reliefs en amont. Ces zones intermédiaires correspondent à des secteurs de transit sédimentaire, où l'oued Amtar transporte et dépose les matériaux érodés sur les versants.

Enfin, le bassin s'ouvre sur une plaine alluviale plus ou moins développée à l'exutoire, résultant de l'accumulation séculaire des sédiments charriés par l'oued Amtar. Cette plaine, lieu de sédimentation préférentielle, contraste avec les dynamiques érosives plus intenses observées à l'amont.

L'évolution géomorphologique de ce bassin versant est donc étroitement liée aux processus d'érosion, de transport et de sédimentation, eux-mêmes contrôlés par la nature géologique du substratum, la vigueur du relief et les conditions climatiques fluctuantes. Les activités humaines, à travers le déboisement et le surpâturage notamment, ont également joué un rôle non négligeable dans la dynamique géomorphologique de ce système fluvial.

II.2.3.11. Cadre topographique

Depuis des siècles, le bassin méditerranéen est reconnu comme une région extrêmement vulnérable aux phénomènes d'érosion hydrique et de mouvements de terrain, sous toutes leurs formes (Morgan, 2005). Occupant une position géostratégique cruciale au sein de ce bassin, le Maroc, disposant de ressources en eau limitées, présente une diversité géographique marquée. Son territoire s'ouvre en effet sur deux façades maritimes distinctes – la Méditerranée au nord et l'Atlantique à l'ouest – tandis que ses parties orientale et méridionale sont exposées aux environnements sahariens. Cette hétérogénéité géographique a des répercussions majeures sur les écosystèmes naturels.

II.2.3.12. Cadre tectonique

Le domaine Rifain en générale composé des nappes de charriage des différentes tailles. Il est affecté par des failles et des rampes latéraux. Les zones internes du Rif sont composées d'unités empilées allochtones. Les Ghomarides chevauche la dorsale calcaire et lui-même chevauche les unités Prédorsalienne. Les nappes de flyschs chevauchent les unités intrarifaine (Ketama, Tanger). La disposition structurale des unités joue un rôle major dans l'orientation des réseaux hydrographique (Figure 21).

L'analyse tectonique réalisée dans un secteur clé de la chaîne du Rif a mis en avant l'existence de trois régimes tectoniques successifs. Le plus ancien est une extension N/S à NE/SW (D1). Les failles formées durant cette phase sont recoupées par d'autres, correspondant à une extension E/W à ENE/WSW (D2). Une dernière phase de compression N/S à NW/SE (D3) est plus récente que ces deux dernières.

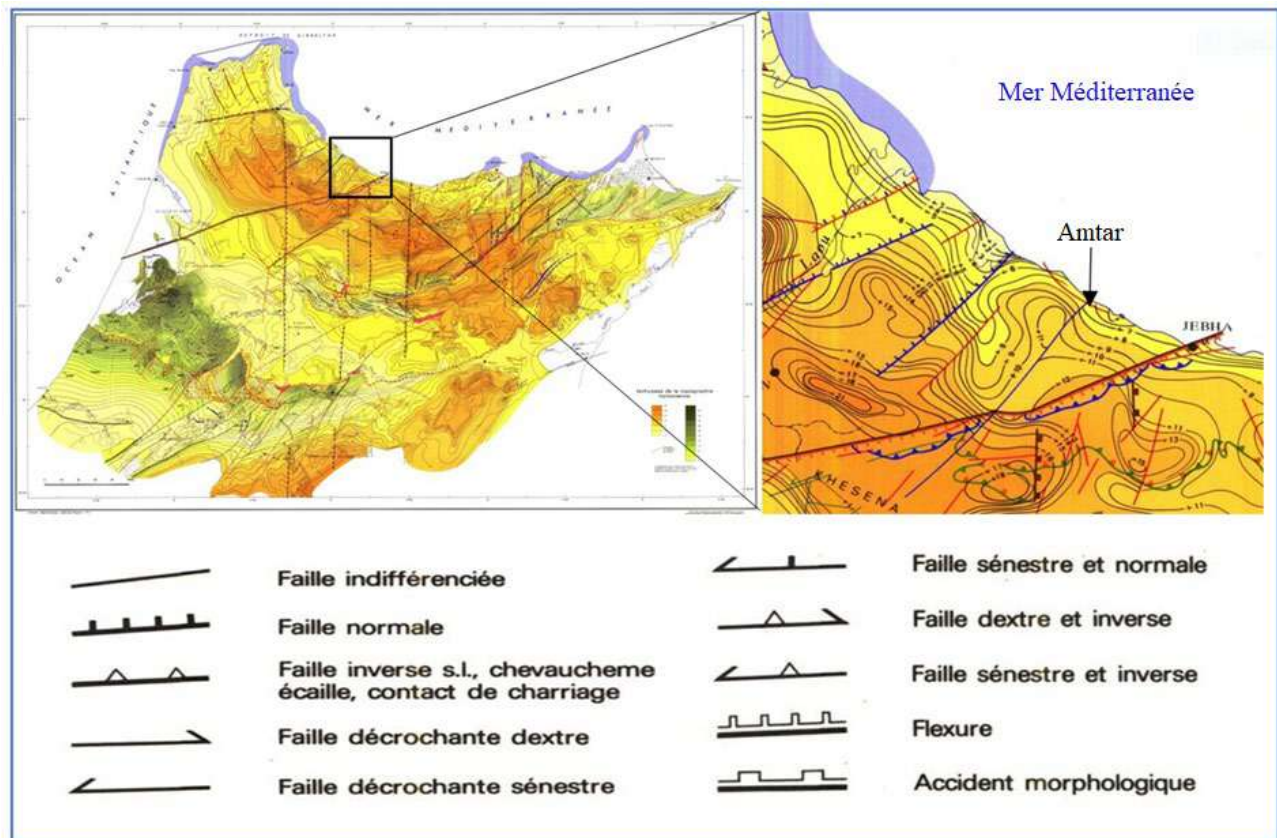


Figure 21 : Carte des mouvements récents du Rif 1/500000 (SGM, 1992)

II.2.3.13. Cadre climatique

La zone d'étude présente un climat méditerranéen tempéré par l'influence de la mer avec des hivers plus froids en altitude. Elle présente également une saison humide qui embrasse les mois allant d'Octobre à mai, et une saison extrêmement sèche s'étalant du mois de juin à septembre avec une température moyenne de 18.3 °C. Les conditions climatiques et la disposition du relief offrent à la zone des potentialités en matière de ressources en eau. La plupart des cours d'eau sont intermittents et ne fonctionnent qu'à la suite de pluies abondantes et continues (*Figure 23, Figure 24* et *Figure 25*). Les longueurs de ce réseau hydrographique varient de quelques kilomètres à plusieurs dizaines de kilomètres, sans atteindre les 100 km (PAC, 2010).

Les sols rencontrés au niveau de la commune sont des sols rouges ferralitiques qui deviennent plus évolués au niveau des plaines (apports alluviaux). Ces formations sont dans l'ensemble favorables à la végétation forestière. La couverture végétale couvre 30 % de l'étendue de la commune ; il s'agit essentiellement des bois.

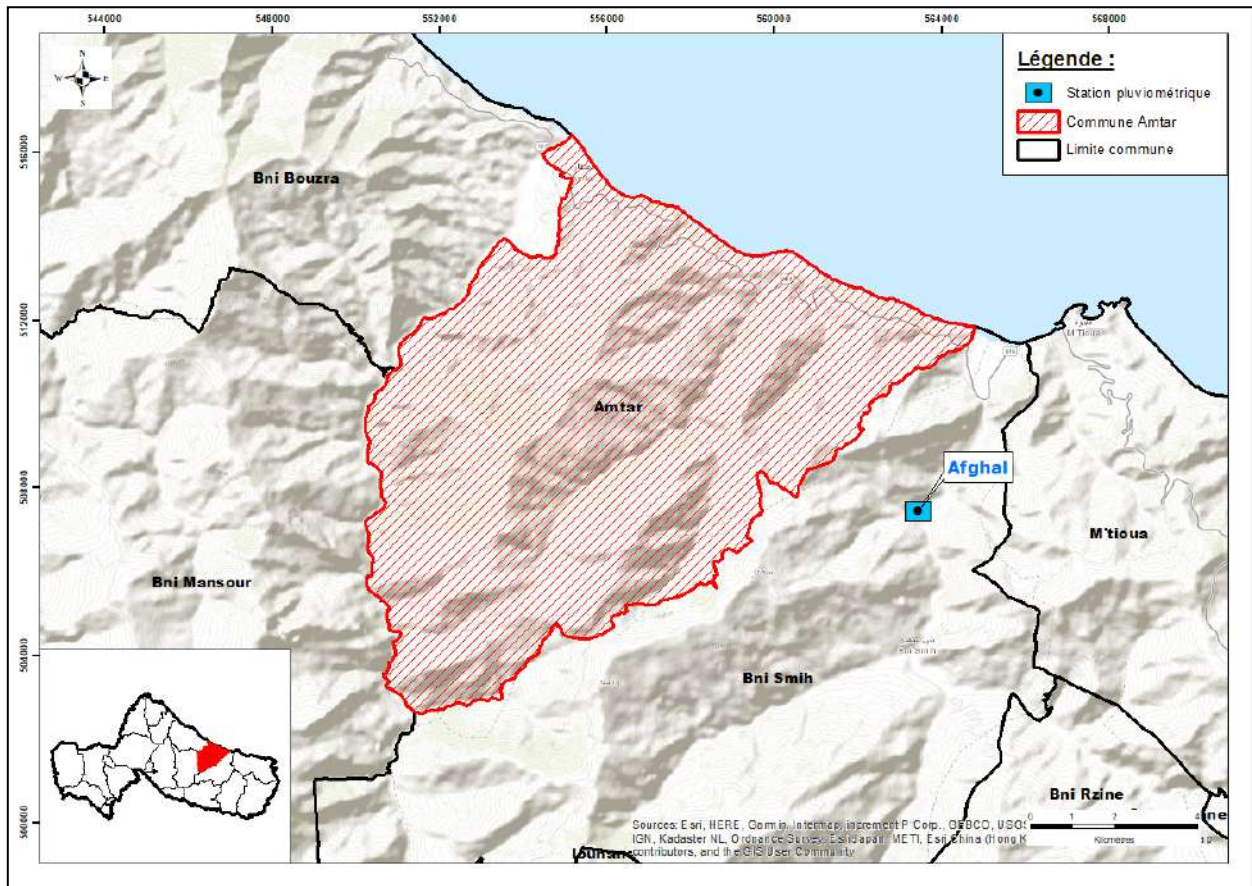


Figure 22 : Carte de situation de la station pluviométrique (station Afghal, ABHL)

Au niveau de la station Afghal, la pluviométrie moyenne interannuelle est de 346.5 mm sur la période 1943-2018. Les hauteurs d'eau précipitées oscillent entre 154 et 790.7 mm/an. L'année la plus sèche est celle de 1981 avec 154 mm et l'année la plus humide correspond à l'année 2008 avec 790.7 mm.

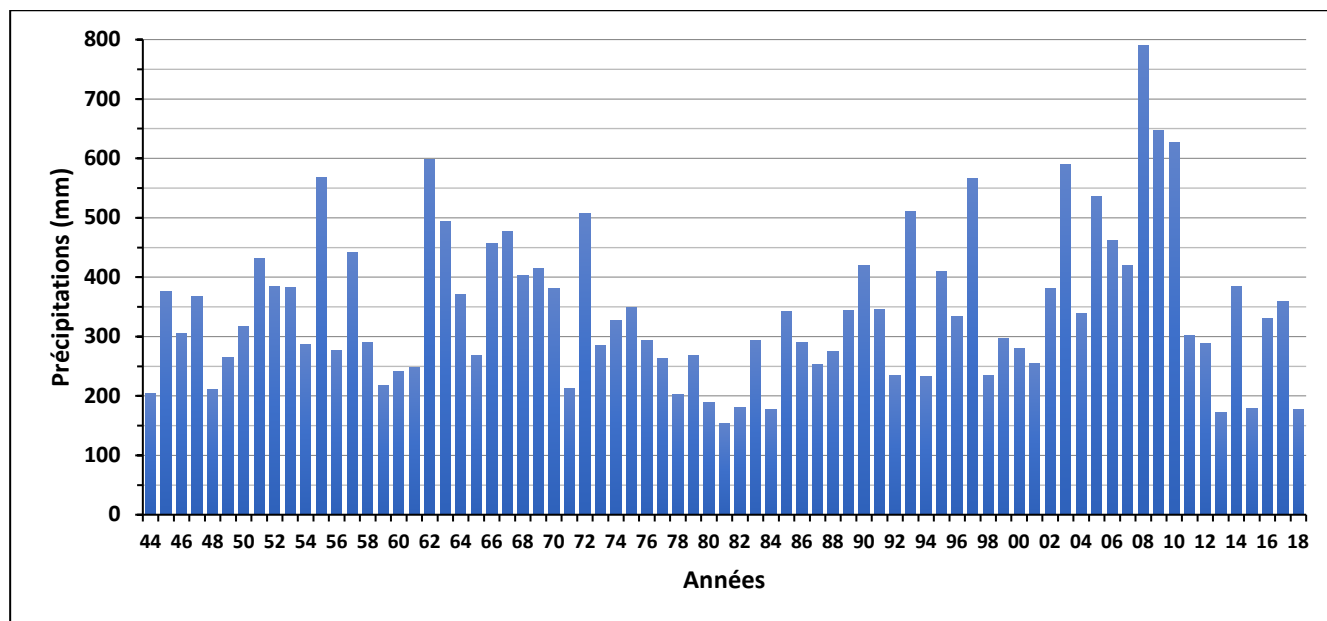


Figure 23 : Précipitations moyennes interannuelles au niveau de la station (Afghal, ABHL)

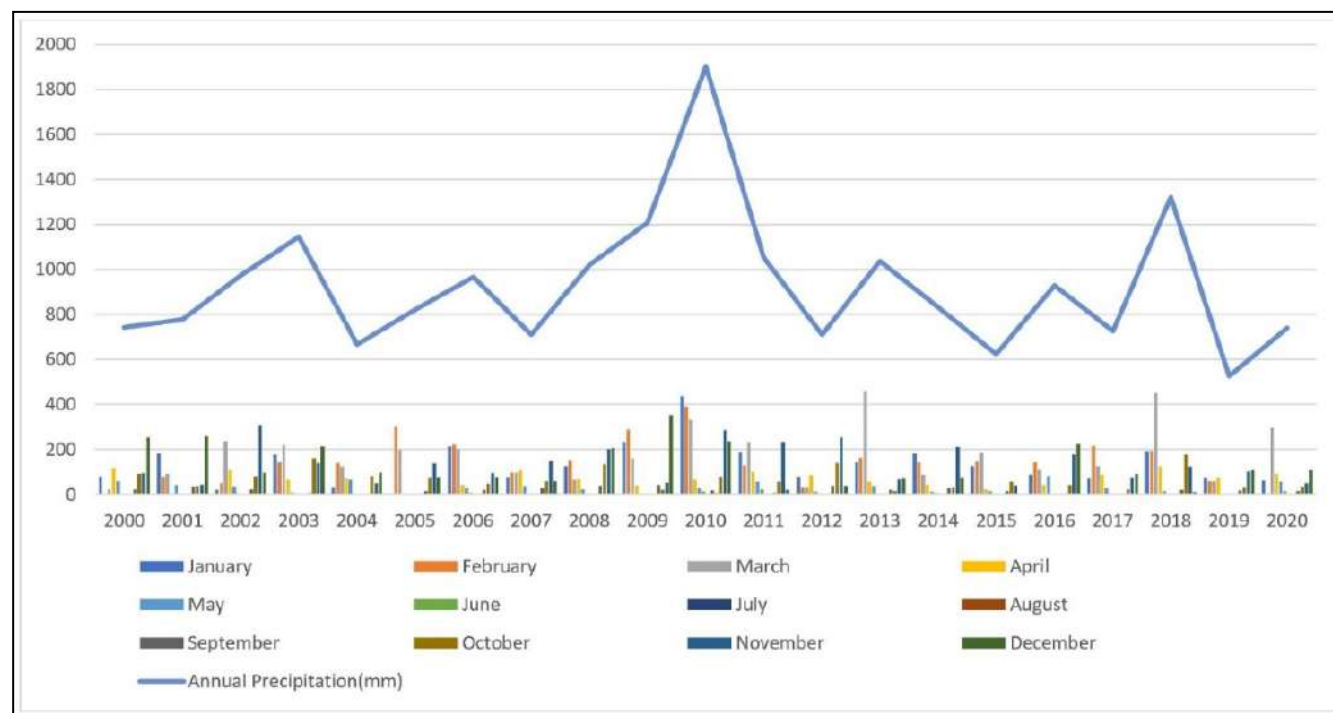


Figure 24 : Précipitations annuelles à la station de Chefchaouen (2000-2020)

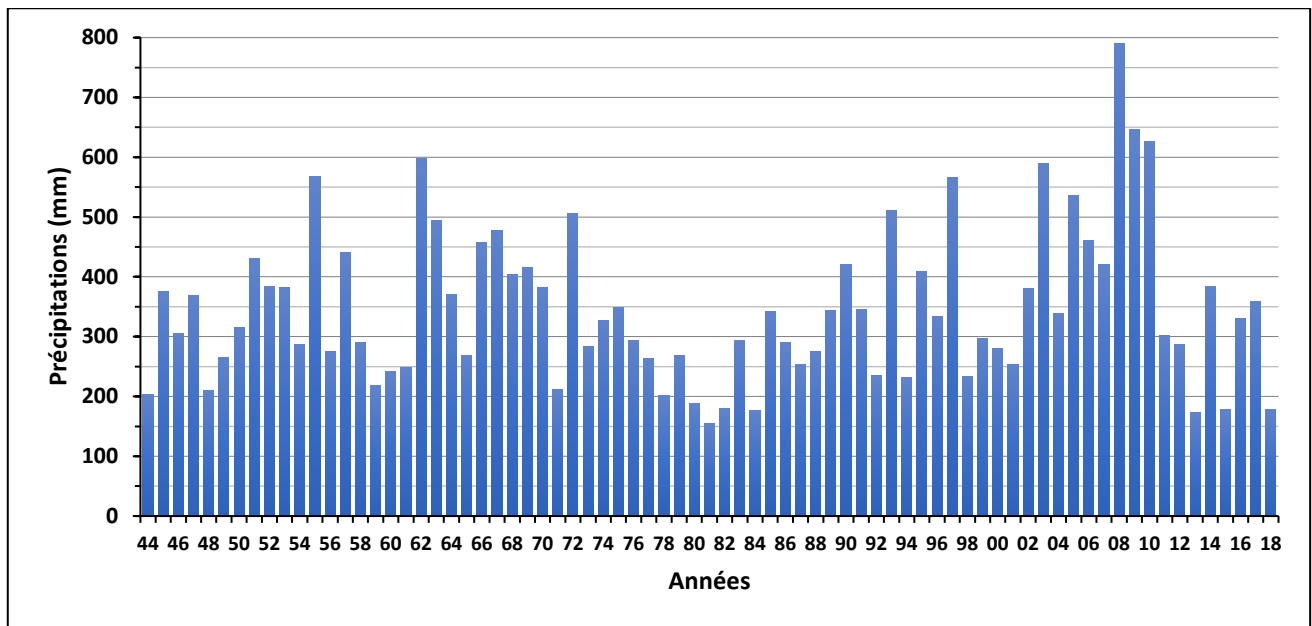


Figure 25 : Précipitations annuelles à la station de Chefchaouen (1944-2018)

II.2.3.14. Cadre hydrologique

II.2.3.14.1. Eau de surface

Le réseau hydrographique dans la commune est constitué par les oueds Amtar Tarhassa, Aoudal et Tarezzalte. Ces cours d'eau appartiennent aux bassins versants Amtar et Tarhassa, qui s'étendent sur une superficie respectivement de 37 et 41 km² (Partie située dans le territoire de la commune) ([Tableau 5](#), [Figure 26](#)).

II.2.3.14.2. Eau souterraine

La plaine de l'oued Amtar renferme une nappe libre radiale à filets convergents, circulant dans les alluvions grossières. La nappe est entourée dans les trois directions NNW, Sud et SSE par des terrains à socle cristallophyllien imperméable caractérisé par un faible échange hydrodynamique. La bordure littorale constitue la limite Est de la nappe (*Tableau 7 & Figure 27*).

Les profondeurs d'eau par rapport au sol sont à moins de 3m en aval. Les profondeurs les plus élevées (plus de 10m) sont observées dans la zone amont et au niveau des bordures.

La variation de la conductivité de 230 Ms/cm à 1670Ms/cm donne lieu à une faible minéralisation (RS : 177 mg/l à 886,7mg/l). Les valeurs les plus élevées sont enregistrées au niveau la bordure Est de la plaine près de la côte tandis que Les valeurs les plus faibles se situent en amont dans les zones d'alimentation de l'aquifère.

Les entrées de la nappe sont l'infiltration efficace des eaux pluviales, les apports latéraux et l'infiltration des surplus d'irrigation alors que les sorties se font par la perte vers la mer, l'évapotranspiration, les prélèvements et le drainage par l'oued.

Tableau 7 : Bilan de la nappe d'Amtar (ABHL2014).

Entrées (l/s)		Sorties (l/s)	
Infiltration à partir des eaux de pluie	6.23	Prélèvements des eaux souterraines pour l'irrigation	2.32
Débit des apports des bordures latéraux	20	Prélèvements des eaux souterraines pour AEP	0.36
Apport de l'écoulement souterrain amont de l'oued	3	Flux aval sortant	23.8
Infiltration des surplus d'irrigation	0.23		
Total des Entrées	29.46	Total des Sorties	26.48
Bilan (l/s)	+ 2.98		

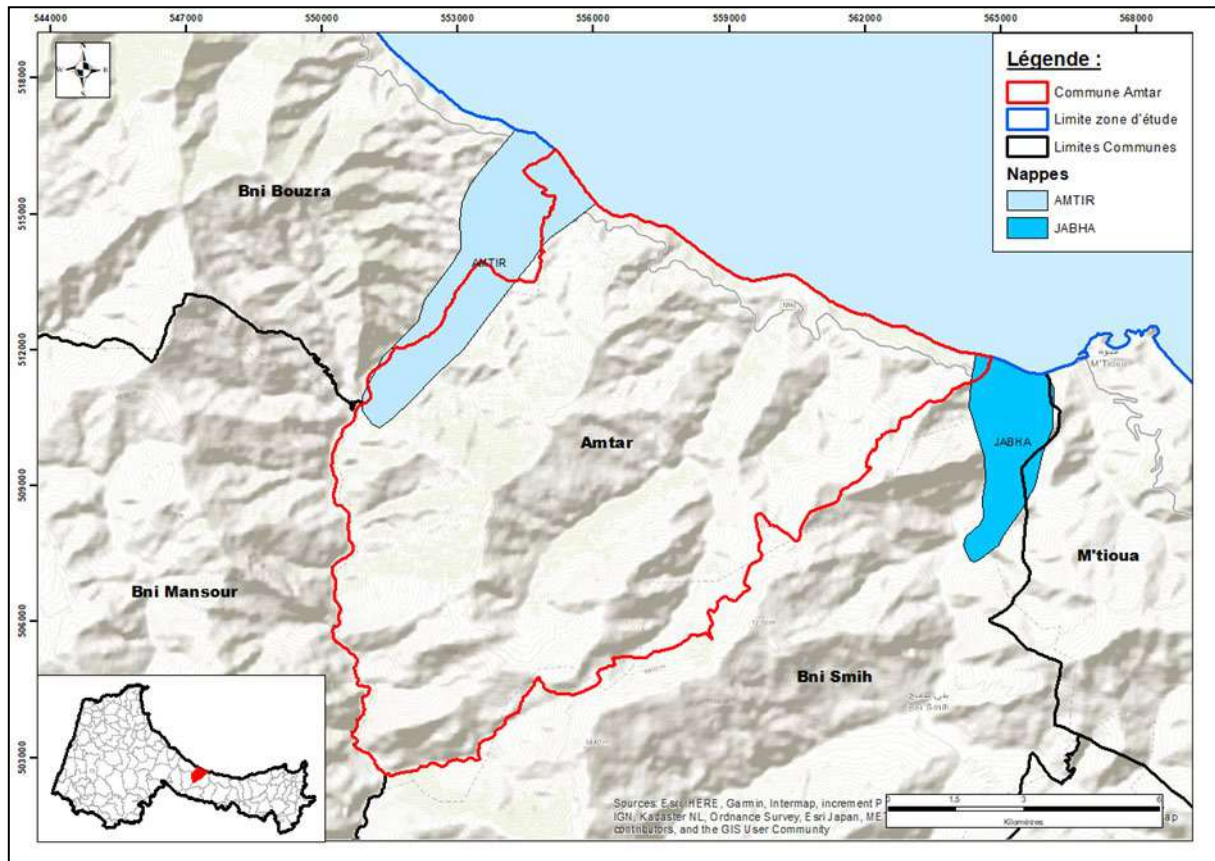


Figure 27 : Carte des ressources en eau souterraines du bassin versant de l'oued Amtar (ABHL)

II.2.3.15. Cadre forestier

Les sols rencontrés au niveau de la commune sont des sols rouges ferralitiques qui deviennent plus évolués au niveau des plaines (apports alluviaux). Ces formations sont dans l'ensemble favorables à la végétation forestière. La couverture végétale couvre 30 % de l'étendue de la commune ; il s'agit essentiellement des bois (*Figure 28*).

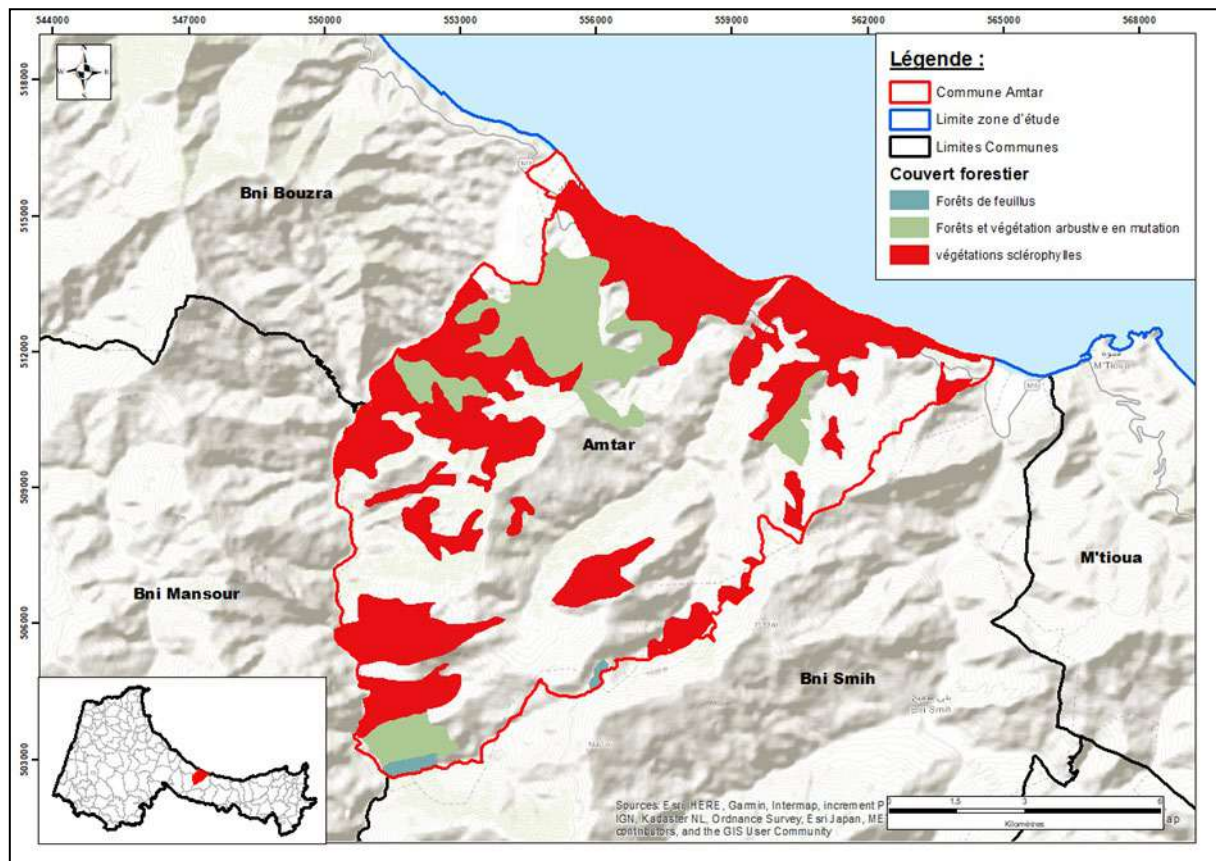


Figure 28 : Carte du couvert forestier du bassin versant de l'oued Amtar (ABHL)

Conclusion du chapitre II

Le bassin versant d'oued Amtar est placé à une position de transition, est à cheval entre les deux premiers domaines, à savoir le domaine interne, caractérisé par les septides au nord, dans la partie médiane il y a les ghomarides et dorsale calcaire. Et le domaine des flyschs, matérialisé par certains nombres de nappes, tels que la nappe de Tizirène, Melloussa, Unité de Tanger, Unité de Ketama, dans la partie sud du BV.

Ce bassin est très marqué de point de vue tectonique. L'évolution tectonique dans la chaîne rifaine est caractérisée par les déformations importantes, qui est été suivi la formation de la chaîne (les rampes latérales, les retro charriages). Une tectonique d'extension a été identifiée tout au long des chaînes côtières de la zone interne de la chaîne du Rif. Il est contemporain de l'élévation des zones côtières.

La forme allonge Nord-Sud de bassin versant d'oued Amtar peut-être entièrement résultat de l'histoire tectonique (Compression E/W, Extension « radiale ») qui est marque par les accidents (Aaraben ; Jebha), et les réseaux de failles qui délimitent le trait de côte, les grands décrochements peuvent façonner l'ouvertures en « Pull-Apart » des bassins d'oued Amtar et d'oued Laou. Des faisceaux de failles semblables ont été cartographiés dans l'ensemble des zones internes, Oued Amtar se situe dans ces réseaux de failles majeurs et constituent, encore aujourd'hui, l'un des bassins versants les plus importants du Rif interne. Les oueds majeurs qui traversent le massif de Beni Bousera passent dans les couloirs des failles.

L'intervention de ces deux factures lithologique et tectonique sans doute joue un rôle majeur dans l'évolution de la forme de ce bassin et son réseau hydrographique le long de temps.

CHAPITRE III : ÉVALUATION DU RISQUE DE L'ÉROSION HYDRIQUE DANS LE BV DE L'OUED AMTAR PAR L'APPROCHE ANALYSE MORPHOMETRIQUE.

Résumé du chapitre III

L'érosion des sols constitue une menace sérieuse pour le développement durable, car il faut plus de 300 ans pour former un centimètre de sol. Cette étude vise à analyser les paramètres morphométriques du bassin de l'oued Amtar, en utilisant des systèmes d'information géographique (SIG) et de la télédétection. L'objectif principal est de prioriser les sous-bassins selon leur susceptibilité à l'érosion, afin de mieux gérer les ressources en eau et en sol.

Une analyse morphométrique a été effectuée sur le bassin de 300 km², en utilisant des données du modèle numérique d'élévation (MNE) du satellite ALOS, avec une résolution de 12,5 m. Les paramètres analysés incluent la longueur des cours d'eau, la densité de drainage, et d'autres caractéristiques géométriques et morphologiques. Ces analyses ont permis de caractériser la texture du réseau de drainage et ses éléments morpho-tectoniques.

Les résultats ont permis d'établir des rangs de priorité pour les sous-bassins, classés en quatre catégories : faible (5 %), modéré (30 %), élevé (35 %), et extrêmement élevé (30 %). Cette classification s'avère cruciale pour orienter les interventions visant à lutter contre l'érosion des sols et à réduire les risques de dangers naturels. La méthode employée démontre son efficacité en tant qu'outil pour améliorer la gestion durable des sols dans cette région.

Mots-clés : Érosion des sols, Bassin d'oued Amtar (Maroc), Analyse morphométrique, Prioritisation, Télédétection et SIG, Risques naturels.

III.1. Introduction

L'érosion est le phénomène de détérioration du sol par l'eau, la pluie, le vent, la glace ou d'autres agents externes, tels que l'ablation, le transport en suspension, le charriage ou les mouvements de masse. Le phénomène d'érosion hydrique est causé par l'influence des eaux sur un sol propice, le niveau de friabilité du substrat, la configuration du relief, la couverture végétale et les méthodes de culture utilisées.

L'étude de la vulnérabilité au phénomène érosif et la définition des zones risquées se basent sur l'examen des facteurs responsables de l'érosion hydrique à savoir : l'agressivité du climat particulièrement des précipitations, l'érodibilité des sols, la topographie (la raideur des pentes), l'occupation du sol et la densité du couvert végétale. La lutte contre ce phénomène et sa complexité imposent aujourd'hui l'utilisation de méthodes et de moyens performants pour la gestion des informations géographiques. L'exécution des mesures efficaces de conservation de sol doit d'abord être précédée par une évaluation dans l'espace du risque d'érosion ([Benzougagh et al., 2020](#) ; [Lakhili et al., 2021](#)). C'est dans cette optique que s'intègre ce travail, dont l'objectif est de localiser les risques actuels ou potentiels de l'érosion hydrique à l'échelle de notre bassin versant de l'oued Amtar, par le biais des Systèmes d'Information Géographique (SIG) qui permettent aux utilisateurs d'avoir l'information relative à la sensibilité des sols à l'érosion, afin de cartographier les zones à risques.

III.2. Intérêts des systèmes d'information géographique (SIG) et l'imagerie pour l'évaluation de l'érosion

Les systèmes d'information géographique (SIG) et l'imagerie constituent des outils particulièrement puissants et pertinents pour l'évaluation de l'érosion. Grâce à leur capacité à acquérir, stocker, analyser et visualiser des données spatiales, les SIG permettent de cartographier précisément les zones affectées par l'érosion et d'en suivre l'évolution dans le temps. L'imagerie satellite, aérienne ou drones, quant à elle, fournit des données de télédétection permettant d'obtenir des informations détaillées sur la topographie, la végétation et l'occupation des sols.

Ces données géospatiales constituent une source d'information essentielle pour identifier les zones sensibles à l'érosion, quantifier les taux d'érosion, et comprendre les processus en jeu. L'intégration des SIG et de l'imagerie dans les études sur l'érosion apporte ainsi une dimension spatiale et temporelle cruciale pour évaluer l'ampleur du phénomène, cibler les actions de lutte et suivre l'efficacité des mesures de conservation des sols mises en place.

Quantification de l'érosion hydrique

Il est souvent ardu de mettre en place des méthodes expérimentales de calcul des bilans d'érosion hydrique. En raison de sa complexité, il est possible de réaliser l'aspect quantitatif de la désagrégation des sols en utilisant deux méthodes. La première approche implique de mesurer l'érosion hydrique en utilisant des modèles qui incluent des éléments morphologiques, climatiques et hydrologiques. Dans la deuxième approche, il est nécessaire d'évaluer les quantités de matières en suspension évacuées par les cours d'eau d'écoulement vers l'exutoire du système étudié (bassin versant).

La plupart des mesures de quantification de l'érosion hydrique sont faites sur des parcelles de taille standard (Wischmeier et al., 1971 ; Roose, 1967, 1998) tandis que, l'étude des transferts en suspension à l'échelle du bassin versant s'avère être un outil efficace pour comprendre et quantifier les processus d'érosion hydrique des sols.

Modélisation du risque d'érosion hydrique.

Les phénomènes d'érosion hydrique découlent d'interactions complexes, qui varient dans le temps et dans l'espace. Pour évaluer les risques de ruissellement et d'érosion, l'utilisation de la modélisation peut être un outil adéquat (Wei et al., 2012 ; Bashari et al., 2024).

Il existe une grande diversité de modèles pour évaluer le risque d'érosion hydrique des sols. On peut classer ces modèles de différentes manières. Par exemple, il est envisageable de procéder à une subdivision en utilisant une échelle de temps sur laquelle un modèle peut être employé : quelques modèles sont élaborés pour anticiper les pertes annuelles de sol (donc à long terme), d'autres pour anticiper les pertes lors d'un orage (donc événementielles), (Van der Knijff, 2010 ; Aleksova et al., 2023).

Alternativement, on peut distinguer les modèles qui anticipent un phénomène d'érosion ponctuel de ceux qui visent des phénomènes de plus grande amplitude. La différence entre les modèles physiques et les modèles empiriques est aussi intéressante à faire (Feyen et al., 2007). Le choix d'un modèle particulier dépend largement du but recherché et des données et du temps disponibles. La plupart demande beaucoup de données pour leurs paramètres d'entrée si bien que leur application à l'échelle régionale devient difficile.

III.3. L'approche Analyse Morphométrique

L'analyse morphométrique d'un bassin versant est le principal facteur qui gouverne le degré de ruissellement et de la gravité des risques hydrologiques (crues, érosion hydrique, inondation, glissement du terrain) ainsi que d'autres facteurs à savoir la lithologie des sols, le couvert végétal, le climat, la

topographie et l'action anthropique (Benzougagh, 2019). La bonne gestion d'un bassin versant, ainsi que l'étude de la hiérarchisation des sous bassins versants, nécessite l'utilisation des techniques des systèmes d'informations géographiques (SIG) et les modèles numériques de terrain (MNT), pour une meilleure évaluation de la zone d'étude en termes de pente, système de drainage, topographie, géomorphologie et lithologie à partir des cartes géologiques.

Ces données ont été utilisées dans l'analyse des paramètres morphométriques du bassin versant et les sous bassins de l'oued Amtar. Ceci a permis de déterminer la priorité des bassins versants dans le but d'une éventuelle protection contre les risques d'inondation et glissement des terrains.

III.3.1. Intérêt de l'analyse morphométrique

L'analyse morphométrique constitue une approche complémentaire aux SIG et à l'imagerie pour mieux comprendre les processus d'érosion. Cette méthode consiste à étudier et à mesurer les caractéristiques géométriques des formes du relief, telles que la pente, la longueur des versants, la profondeur et la densité des ravines ou des rigoles. Ces paramètres morphologiques fournissent des informations essentielles sur la susceptibilité des sols à l'érosion hydrique. Par exemple, les zones à forte pente et avec un réseau de ravines dense sont généralement plus exposées à l'érosion.

L'analyse morphométrique permet également d'identifier les principaux facteurs qui contrôlent la dynamique érosive, comme la lithologie, la couverture végétale ou les pratiques de gestion des terres. Couplée aux données issues des SIG et de la télédétection, l'analyse morphométrique offre une compréhension plus fine des processus érosifs, de leur variabilité spatiale et de leur évolution temporelle. Cette approche multiscalaire et pluridisciplinaire est donc très précieuse pour diagnostiquer les problèmes d'érosion, prioriser les actions de lutte et suivre l'efficacité des mesures de conservation des sols à long terme.

III.3.2. Données et logiciels utilisés pour l'analyse

Ce travail de thèse était essentiellement basé sur l'analyse morphométrique des sous-bassins d'oued Amtar, afin d'établir des priorités et de localiser les zones sujettes à l'érosion du bassin versant en vue de l'élaboration d'un plan de conservation. Pour évaluer les conditions morphométriques, les données DEM (résolution de 30m par 30m) a été télécharger à partir du site web : <http://www.gdem.aster.ersdac.or.jp/download.jsp>

La numérisation des cours d'eau dendritiques a été réalisée dans un environnement SIG. Le réseau de cours d'eau du bassin a été analysé et l'ordre des cours d'eau a été établi à l'aide de la loi de Strehler. Pour chaque sous-bassin, les limites du bassin versant et du bassin ont été délimitées à l'aide du logiciel

QGIS. L'entrée et la sortie sont définies pour délimiter le sous-bassin. Les logiciels QGIS et Arc SWAT ont été utilisés pour la création, la gestion et la génération de différentes couches et cartes. Microsoft Excel a été utilisé pour les calculs mathématiques.

La technologie des systèmes d'information géographique (SIG) a été utilisée comme outil d'analyse. Le SIG est devenu un outil puissant pour traiter les données géoréférencées spatiales et non spatiales, pour la préparation et la visualisation des données d'entrée et de sortie, et pour l'interaction avec les modèles. Il existe un potentiel considérable pour l'utilisation de la technologie SIG comme aide à l'inventaire de l'érosion du sol en référence à la modélisation de l'érosion du sol et à l'évaluation du risque d'érosion. Le SIG peut être utilisé pour passer à l'échelle régionale et pour quantifier les différences dans les estimations de perte de sol produites par les différentes échelles de cartographie des sols utilisées comme couche de données dans le modèle. L'utilisation intégrée de la télédétection et du SIG pourrait aider à évaluer la perte quantitative de sol à différentes échelles et également à identifier les zones qui présentent un risque d'érosion du sol. La modélisation spatiale implique l'utilisation du SIG pour la représentation du modèle conceptuel et l'exécution de calculs mathématiques simples sur les attributs d'objets SIG stockés pour afficher les résultats dans l'espace (Bhaware, 2006 ; Abbasi et al., 2023).

Il est encore souvent utilisé pour dresser des cartes' alors qu'il peut faire beaucoup plus. Les bases de données SIG permettent d'obtenir des informations plus récentes ou d'estimer des informations qui n'étaient pas disponibles auparavant et d'effectuer des analyses complexes. Ces informations peuvent permettre de mieux comprendre un lieu, de faire les meilleurs choix ou de se préparer à des événements et conditions futurs. Ces outils permettent le plus souvent d'analyser facilement des informations géographiques telles que : cartographier l'emplacement des choses, cartographier les valeurs maximales et minimales, cartographier la densité, trouver ce qui se trouve à l'intérieur (analyse d'intersection), trouver ce qui se trouve à proximité (analyse de proximité), cartographier les changements (analyse de superposition), etc.

La principale raison d'utiliser un SIG est que le processus d'érosion varie dans l'espace, et qu'il convient donc d'utiliser des tailles de cellules permettant de prendre en compte les variations spatiales. Les différents auteurs ont également indiqué que la quantité de données nécessaires pour un grand nombre de cellules est indispensable pour une représentation précise du bassin versant (Farhan and Nawaiseh, 2015 ; Singh and Panda, 2017).

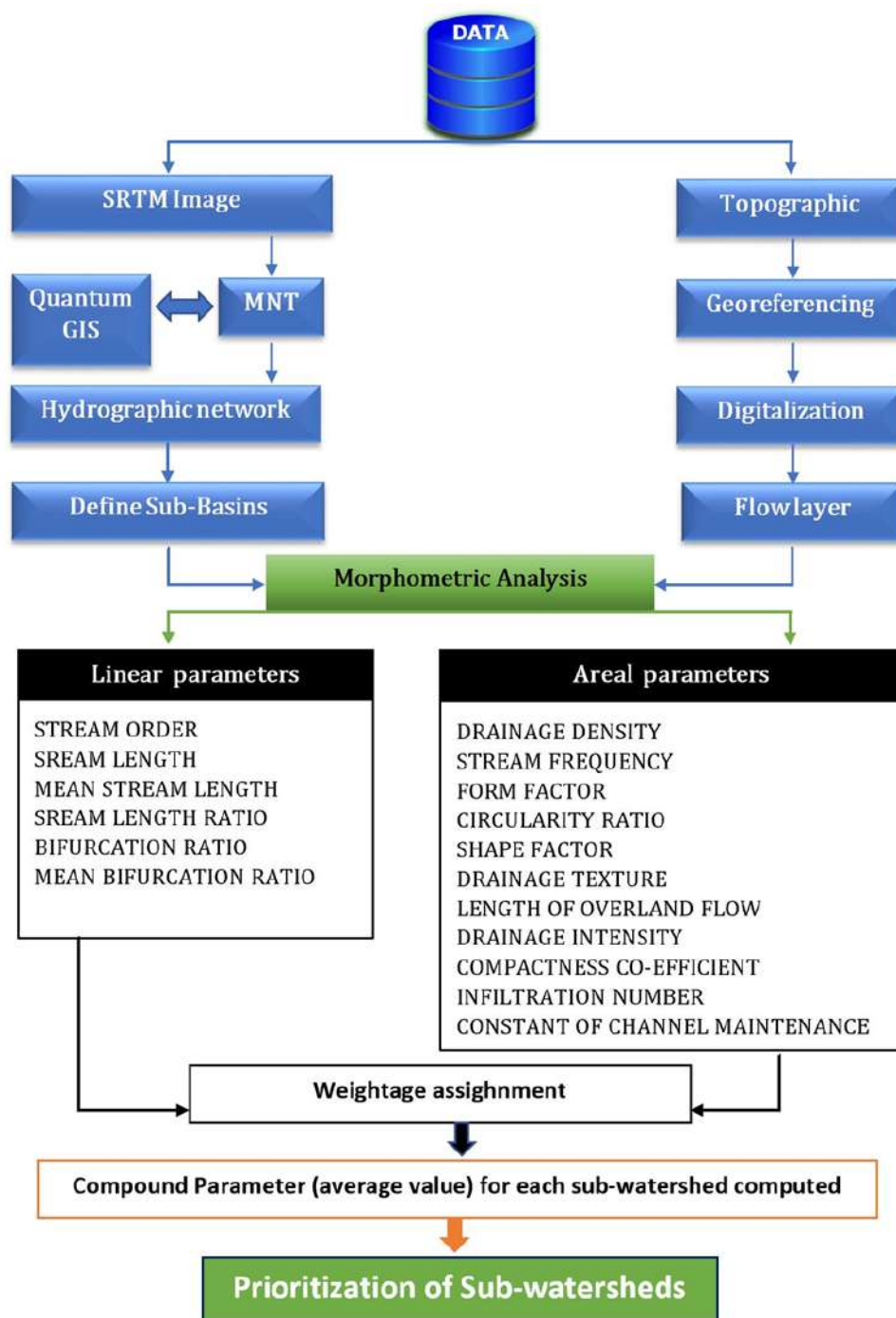


Figure 29 : Méthodologie du travail pour l'analyse morphométrique. (el brahimi et all, 2024)

III.3.3. Modélisation hydrologique pour la caractérisation des bassins versants à l'aide du SIG

La modélisation hydrologique dans un environnement SIG se concentre sur l'hydrologie pour la modélisation des flux et la délimitation des bassins versants. Cet environnement SIG fonctionnait avec des ensembles de données matricielles de la forme de la surface pour déterminer l'écoulement de l'eau à travers elle. L'extension d'analyse hydrologique dans SIG environnement fournit une méthode pour décrire les caractéristiques physiques d'une surface. En utilisant un modèle numérique d'élévation

(MNE) comme entrée, il est possible de délimiter un système de drainage et de quantifier les caractéristiques de ce système. Les outils de l'extension vous permettent de déterminer, pour n'importe quel point d'une grille, la zone de pente ascendante contribuant à ce point et la trajectoire descendante de l'écoulement de l'eau.

La compréhension de la forme de la surface de la Terre est utile dans de nombreux domaines tels que l'aménagement des bassins versants régionaux, l'agriculture et la sylviculture. Ces domaines nécessitent de comprendre comment l'eau s'écoule à travers une zone et comment les changements dans cette zone peuvent affecter cet écoulement ([Mind'je et al., 2021](#) ; [Alshammari et al., 2024](#)).

Par conséquent, pour l'analyse du modèle hydrologique, il est important de déterminer le comportement de l'eau, d'où elle vient et où elle va, pour la caractérisation morphométrique par la délimitation des bassins versants. La délimitation a été expliquée comme la création d'une frontière qui représente la zone de contribution pour un point de contrôle particulier ou un exutoire qui a été utilisé pour définir les limites de la zone d'étude, et/ou pour diviser la zone d'étude en sous-zones. La délimitation du bassin versant fait partie du processus connu sous le nom de segmentation du bassin versant, c'est-à-dire la division du bassin versant en segments discrets de terre et de canaux afin d'analyser le comportement du bassin versant ([Benzougagh et al., 2016 & 2017](#)). Elle est nécessaire pour la modélisation du bassin et le rapport de caractérisation du bassin versant. Cette thèse a donc été réalisée pour caractériser et étudier ce qui se passe dans une partie de la zone d'étude par rapport à une autre.

III.3.4. Calcul des paramètres morphométriques

Les sous-bassins versants de l'oued Amtar et les réseaux de cours d'eau associés (affluents) ont été délimités. Les paramètres de base considérés comme les caractéristiques géométriques (superficie et périmètre du bassin, longueur et nombre de cours d'eau) ont été obtenus automatiquement à partir du logiciel SIG par des mesures directes. Ces caractéristiques géométriques ont été utilisées comme données d'entrée pour l'analyse morphométrique. Pour ce faire, les méthodes de différents chercheurs comme celles de Strehler, Horton et Miller ont été utilisées pour évaluer les caractéristiques fluviales des bassins versants ([Panhalkar et al., 2012](#), [Meshram et al., 2023](#)).

Dans l'analyse morphométrique, nous devons prendre en compte trois aspects, à savoir l'aspect linéaire, l'aspect de forme et l'aspect du relief. L'aspect linéaire est subdivisé en ordre du cours d'eau (U), longueur du cours d'eau (Lu), rapport de longueur du cours d'eau (Rl) et rapport de bifurcation (Rb). De même, l'aspect de forme est divisé en densité de drainage (Dd), ratio de texture de drainage (Dt), fréquence du cours d'eau (Fs), facteur de forme (Rf), ratio de circularité (Rc), ratio d'élongation (Re) et longueur de l'écoulement en surface (Lof). L'aspect du relief est également divisé en Basin (Bh),

l'indice de rugosité (Rn) et le rapport de relief (Rh). La formule de calcul des paramètres morphométriques a été examinée en détail dans le tableau suivant (*Tableau 8*).

Tableau 8 : Méthodes de calcul des paramètres morphométriques.

Paramètres géomorphologiques	Symbole	Méthodes de calcul	Unité	Référence
Paramètres morphométriques linéaires				
Ordre des flux	U	Classement hiérarchique		(Strahler, 1964)
Numéro de flux	Nu	$Nu = N1 + N2 + \dots + Nn$		(Horton, 1945)
Longueur du cours d'eau	Lu	$Lu = L1 + L2 + \dots + Ln$	Km	(Horton, 1945)
Longueur moyenne du cours d'eau	lsm	$lsm = lu / nu$	Km	(Strahler, 1964)
Rapport de longueur de cours d'eau	Rl	$Rl = lu / l(u-1)$		(Horton, 1945)
Rapport de bifurcation	Rb	$Rb = \lambda / n(u+1)$		(Horton, 1945)
Paramètres morphométriques de la forme du relief				
Facteur de forme	Ff	$Ff = A / Lb^2$		(Horton, 1932)
Rapport d'allongement	Re	$Re = (2 / Lb) \times (A/n)^2$		(Schumm, 1956)
Rapport circulatoire	Rc	$Rc = 4Na / P^2$		(Miller, 1953)
Coefficient de compacité	Cc	$Cc = P / 2\sqrt{\pi A}$		(Horton, 1945)
Paramètres morphométriques surfaciques				
Fréquence du flux	Fs	$Fs = Nu / A$	1/km ²	(Horton, 1945)
Drainage texture	Dt	$Dt = nu / p$	1/km	(Horton, 1945)
Densité de drainage	Dd	$Dd = Lu / A$	km/km ²	(Horton, 1932)
Numéro d'infiltration	If	$If = Dd \times Fs$	1/km ³	(Faniran, 1968)
Longueur de l'écoulement de surface	Lo	$Lo = 1 / (2 \times Dd)$	Km	(Horton, 1945)
Constante de maintenance des canaux	C	$C = 1 / Dd$	Km	(Schumm, 1956)
Paramètres morphométriques linéaires				
Relief du bassin	R	$R = H - h$		(Schumm, 1956)
Rapport de décharge	Rr	$Rr = (H - h) / Lb$		(Schumm, 1956)
Nombre de robustesse	Rn	$Rn = Dd \times (H - h)$		(Schumm, 1956)
Dégradé de canal	Cg	$Cg = (H - h) / (n / 2 \times Lb)$		(Singh et al., 2014)
Index de dissection	Din	$Din = (H - h) / H$		(Gravelius, 1941)

III.3.5. Classement des sous-bassins versants sur la base des résultats de l'analyse morphométrique

Dans l'analyse morphométrique, chaque caractéristique morphométrique est considérée comme un paramètre unique et un rang de priorité basé sur la connaissance a été attribué selon le résultat morphométrique en considérant son rôle dans l'érosion hydrique du sol. Pour l'aspect linéaire, un poids important a été accordé aux valeurs élevées. La valeur la plus élevée de chacun des paramètres morphométriques (c'est-à-dire le rapport de bifurcation, la densité de drainage, la fréquence des cours d'eau et le rapport de texture de drainage, ...etc.) pour chaque sous-bassin hydrographique a été notée 1, la valeur la plus élevée suivante a été notée 2, et ainsi de suite, car les paramètres morphométriques présentent généralement une corrélation positive avec l'érosion hydrique du sol.

Inversement, les aspects de forme ont reçu une faible pondération pour les valeurs élevées du facteur de forme, du rapport de circularité, du rapport d'élongation, de la longueur de l'écoulement de surface et de la constante de compacité. La valeur la plus faible a reçu une note de 1, la valeur suivante la plus faible a reçu une note de 2, et ainsi de suite, car les paramètres d'aspect aréolaire présentent généralement une corrélation négative avec l'érosion hydrique du sol ([Panhalkar et.al, 2012](#) ; [Das, 2014](#) ; [Benzougagh et al., 2022](#)).

III.3.6. Détermination du classement moyen et de la priorité finale

Après avoir attribué un classement sur la base de chaque paramètre, les valeurs évaluées pour chaque bassin versant ont été moyennées pour obtenir une valeur composite. Sur la base de la valeur moyenne de ces paramètres, le sous-bassin versant ayant la valeur la plus faible de l'évaluation composite se voit attribuer la priorité la plus élevée, notée 1 ; le sous-bassin versant ayant la valeur suivante la plus élevée de l'évaluation composite se voit attribuer une priorité notée 2, et ainsi de suite. Le sous-bassin versant qui a obtenu la valeur la plus élevée du facteur composite se voit attribuer le dernier numéro de priorité. Enfin, les priorités finales ont été classées en trois grandes catégories : priorité élevée, priorité moyenne et priorité faible. La priorité élevée des sous-bassins versants indique les zones les plus vulnérables à l'érosion des sols qui doivent faire l'objet d'une grande attention pour le processus de remise en état et le plan d'action pour la conservation des sols ([Das, 2014](#) ; [Benzougagh et al., 2022](#) ; [Ali et al., 2024](#)).

III.3.7. Résultats et discussion

III.3.7.1. Délimitation des sous-bassins versants de l'oued Amtar

Fondamentalement, il existe deux méthodes de délimitation des bassins versants : la méthode manuelle et la méthode automatique.

- La méthode de délimitation manuelle des bassins versants permet à l'utilisateur de définir l'ensemble de la zone contribuant à l'écoulement au niveau d'un exutoire, sur la base de la connaissance de la topographie. Elle nécessite des données sous-jacentes de type Shape file ou Grid MNT pour la précision des limites des bassins versants existants et des couches de cours d'eau. La délimitation des bassins versants a été réalisée en cliquant sur la carte à l'aide de la souris.
- Les méthodes de délimitation automatique des bassins versants sont également appelées approches basées sur le MNT ou sur la grille. La délimitation automatique (basée sur le MNT) crée les couches SIG nécessaires à la mise en place d'un modèle dans lequel l'eau s'écoule vers le bas et les limites sont créées automatiquement par l'ordinateur. L'option de brûlage des caractéristiques des cours d'eau a été utilisée pour s'assurer que l'écoulement est forcé vers les cellules qui correspondent aux emplacements réels des réseaux de cours d'eau et résout certains des problèmes liés à l'imprécision des données d'élévation. La définition des cours d'eau détermine la zone de drainage nécessaire pour former le début d'un cours d'eau, la taille et le nombre de sous-bassins versants.

Il est également possible de modifier manuellement l'exutoire des bassins versants utilisés pour spécifier les emplacements d'exutoire souhaités pour la délimitation des sous-bassins versants. Les sous-bassins versants ont été utilisés pour l'analyse des bassins versants et les rapports de caractérisation des bassins versants. C'est pourquoi cette thèse a été réalisée par la méthode de délimitation automatique des bassins versants en utilisant QGIS pour les sous-bassins de l'oued Amtar.

En outre, d'autres paramètres hydrologiques du SIG, tels que l'opération de remplissage pour l'identification et le remplissage des puits dans le MNT, le calcul et la création de la carte de direction des flux, le calcul et la création de la carte d'accumulation des flux, la création de la carte du réseau de cours d'eau à partir de la grille d'accumulation des flux et la création de la carte matricielle de l'ordre des cours d'eau à partir de la carte matricielle du réseau de cours d'eau ont été obtenus en utilisant Arc GIS (*Figure 30*).

L'ensemble des sous-bassins de l'oued Amtar a été divisé en vingt sous-bassins versants. Ces sous-bassins versants ont été choisis pour être classés par ordre de priorité sur la base d'une analyse morphométrique. Le réseau de drainage est un indicateur significatif du processus de développement du relief dans une unité géographique ([Horton, 1932 & 1945](#)). A déclaré qu'un bassin versant est une unité idéale pour comprendre les processus géomorphologiques et hydrologiques et pour évaluer le modèle de ruissellement des cours d'eau. Par conséquent, pour la hiérarchisation de chaque sous-bassin versant, l'analyse morphométrique de bassin versant de l'oued Amtar a été effectuée en utilisant la

Évaluation des risques d'érosion de surface et profonde à oued Amtar (Rif, Maroc)

signification physique de divers paramètres morphométriques dans trois aspects (aspect linéaire, aspect de forme et aspect du relief), comme indiqué dans les descriptions respectives.

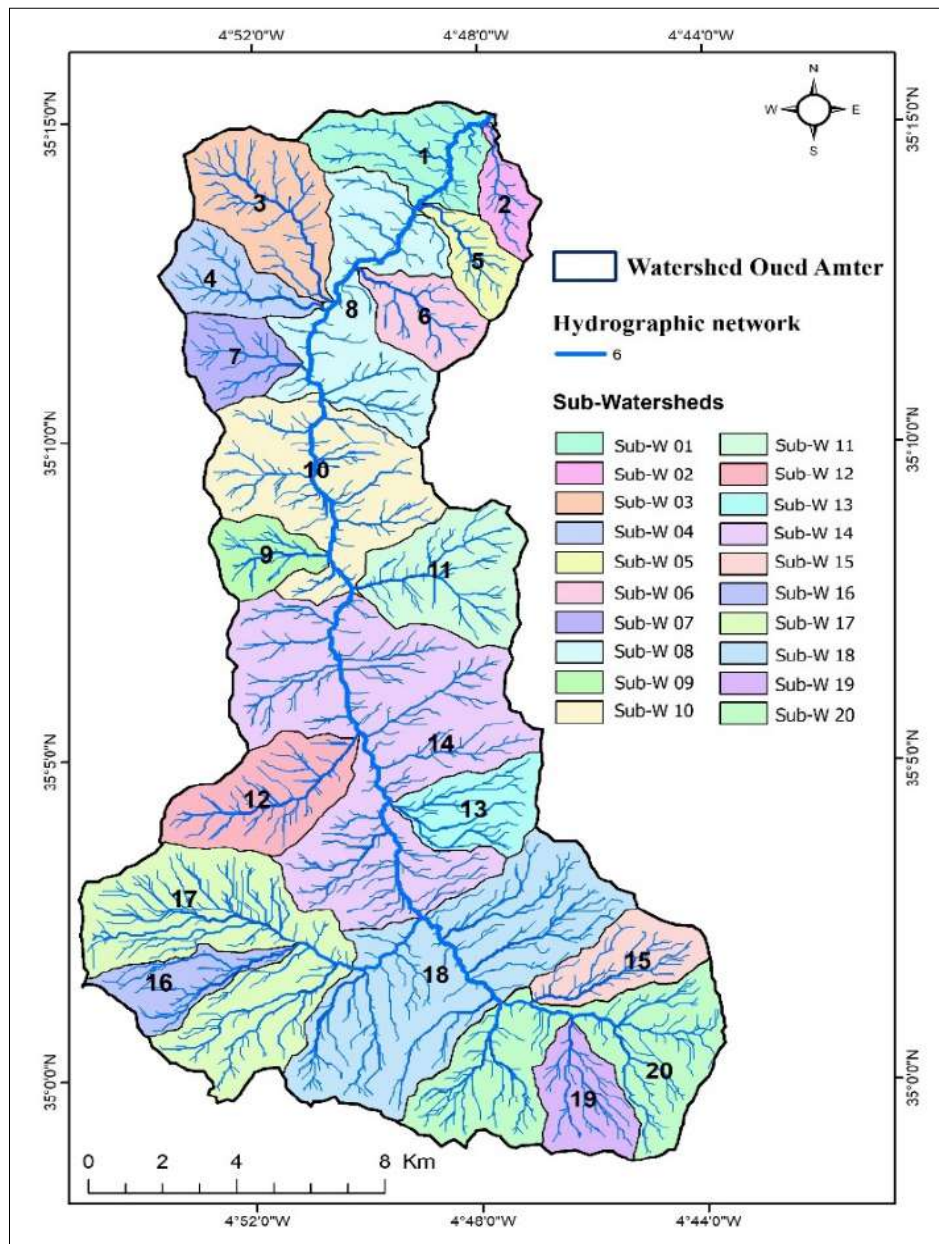


Figure 30 : Carte des sous-bassins versants et du réseau hydrographique du bassin de l'oued Amtar

III.3.7.2. Calcul des paramètres morphométriques de l'oued Amtar

III.3.7.2.1. Aspect Linéaire

III.3.7.2.1.1. Ordre de flux (nu)

Le travail initial d'analyse morphométrique du bassin versant commence par la démonstration de l'ordre des cours d'eau. Un certain nombre de paramètres ont été développés pour représenter le schéma de drainage. L'ordre des cours d'eau selon la méthode de Strehler (1964) est utilisé pour analyser le schéma

de drainage de la zone d'étude. La méthode Strehler a été suivie en raison de sa simplicité, où les plus petits courants non ramifiés sont désignés comme étant de 1^{er} ordre, la confluence de deux canaux de 1^{er} ordre donne un segment de canal de 2^{ème} ordre, deux courants de 2^{ème} ordre se rejoignent pour former un segment de 3^{ème} ordre, et ainsi de suite. Lorsque deux canaux d'ordre différent se rejoignent, l'ordre supérieur est maintenu. Le tronc commun est le segment de cours d'eau de l'ordre le plus élevé. Dans cette étude, l'ensemble du drainage dans les deux bassins versants a été réparti en six ordres (*Figure 31*).

Au total, 9924 cours d'eau ont été identifiés pour le bassin versant de l'oued Amtar, dont 5 697 sont de premier ordre, 2 461 de deuxième ordre, 996 de troisième ordre, 406 de quatrième ordre, 64 de cinquième ordre et 300 cours d'eau de sixième ordre. Le résultat calculé correspond à celui de Strehler, qui décrit que le nombre total de cours d'eau diminue progressivement au fur et à mesure que l'ordre des cours d'eau augmente.

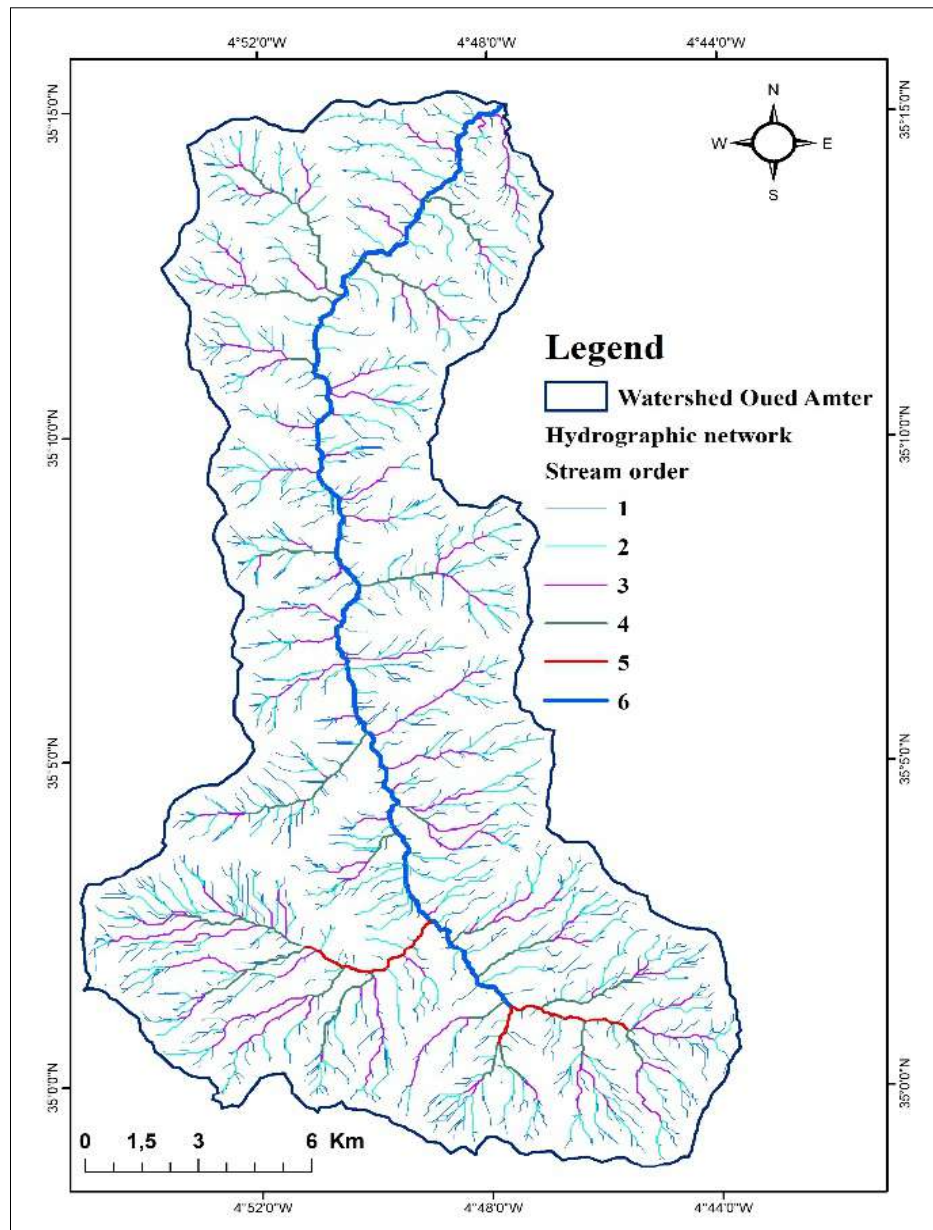


Figure 31 : Carte de l'ordre des cours d'eau du bassin versant de l'oued Amtar

III.3.7.2.1.2. Nombre du flux (Nu)

Le nombre de cours d'eau est le nombre de segments de cours d'eau de différents ordres dans les bassins versants. Chaque segment de cours d'eau a été numéroté en commençant par le premier ordre jusqu'à l'ordre maximal présent dans chacun des sous-bassins. Après la numérotation, les éléments du réseau de drainage se voient attribuer leur numéro d'ordre, les segments de chaque ordre sont comptés pour obtenir le nombre Nu de segments du réseau de drainage. Les segments de chaque ordre sont comptés pour obtenir le nombre Nu de segments de l'ordre donné U (Horton, 1945).

Le nombre total de cours d'eau de tous les ordres pour chaque sous-bassin versant de l'oued Amtar a été exprimé dans le (Tableau 9). Les nombres maximum et minimum de cours d'eau étaient Évaluation des risques d'érosion de surface et profonde à oued Amtar (Rif, Maroc)
Apport des outils géomatiques et de machine Learning

respectivement de 1757 (SBV-14), 64 (SBV-2). En outre, la présence d'un grand nombre de cours d'eau dans le bassin indique que la topographie est encore en cours d'érosion, et en même temps, un nombre moindre de cours d'eau indique une topographie mature.

Tableau 9 : Nombre de cours d'eau dans les sous-bassins de l'oued Amtar

Sous-bassins versants	Nombre du flux (Nu) de chaque ordre (u)						Total
	1	2	3	4	5	6	
1	91	70	13	1	0	24	199
2	36	11	15	0	0	2	64
3	189	89	40	38	0	0	356
4	71	38	23	14	0	0	146
5	63	19	4	10	0	0	96
6	128	40	8	12	0	0	188
7	75	48	28	3	0	0	154
8	301	123	44	6	0	68	542
9	169	77	13	29	0	0	288
10	596	196	89	4	0	75	960
11	293	121	30	29	0	0	473
12	430	132	52	45	0	0	659
13	201	93	65	4	0	2	365
14	1044	434	152	16	0	111	1757
15	94	41	15	20	0	0	170
16	205	53	27	20	1	0	306
17	596	298	123	40	12	0	1069
18	629	312	145	72	15	18	1191
19	124	87	38	10	1	0	260
20	362	179	72	33	35	0	681
Bassin de l'oued Amtar	5697	2461	996	406	64	300	9924

III.3.7.2.1.3. Longueur totale et moyenne du flux

La longueur des cours d'eau est l'une des caractéristiques hydrologiques les plus importantes du bassin, car elle révèle les caractéristiques du ruissellement de surface. C'est un indicateur de la contribution de la zone au bassin versant, de la pente du bassin versant ainsi que du degré de drainage. Le nombre de cours d'eau de différents ordres dans un bassin versant est compté et leur longueur, de l'embouchure à la ligne de partage des eaux, est mesurée à l'aide d'un logiciel SIG. La longueur totale des cours d'eau

est la somme de toutes les longueurs de tous les ordres de cours d'eau. La longueur totale des cours d'eau divisée par le nombre de segments de cours d'eau de cet ordre donne la longueur moyenne des cours d'eau pour cet ordre Strehler, (1964).

La longueur moyenne d'un canal est une propriété dimensionnelle qui révèle la taille caractéristique des composants du réseau de drainage et des surfaces de bassin versant qui y contribuent, elle est exprimée en « km ». La longueur totale et la longueur moyenne des cours d'eau pour les sous-bassins versants de l'oued Amtar sont présentées dans le (Tableau 10). Les cours d'eau d'une longueur relativement faible sont caractéristiques des zones présentant des pentes plus importantes et des textures plus fines. Les cours d'eau plus longs indiquent généralement une pente plus faible (Benzougagh et al., 2016).

Tableau 10 : La longueur totale et la longueur moyenne du flux des sous bassin versant de l'oued Amtar

Sous-Bassins versants	Longueur du cours d'eau (Lu)						Moyenne Lu (Lsm ; km)	Rapport de longueur de flux RL					RL moyen
	1	2	3	4	5	6		2//1	3//2	4//3	5//4	6//5	
1	14,52	9,16	2,65	0,09	0,00	4,34	5,13	0,63	0,29	0,04	0,00	—	0,24
2	4,89	1,91	3,41	10,22	0,00	0,00	3,41	0,39	1,79	2,99	0,00	—	1,29
3	16,10	10,83	5,14	5,04	0,00	0,00	6,19	0,67	0,47	0,98	0,00	—	0,53
4	9,18	3,52	3,05	2,61	0,00	0,00	3,06	0,38	0,87	0,86	0,00	—	0,53
5	7,59	2,83	0,84	2,44	0,00	0,00	2,28	0,37	0,30	2,89	0,00	—	0,89
6	8,28	4,02	2,81	2,68	0,00	0,00	2,96	0,49	0,70	0,95	0,00	—	0,53
7	9,47	4,55	3,46	0,51	0,00	0,00	3,00	0,48	0,76	0,15	0,00	—	0,35
8	25,17	15,32	6,50	0,59	0,00	7,92	9,25	0,61	0,42	0,09	0,00	—	0,28
9	10,74	4,71	1,24	2,37	0,00	0,00	3,18	0,44	0,26	1,91	0,00	—	0,65
10	43,86	16,83	8,64	0,20	0,00	6,96	12,75	0,38	0,51	0,02	0,00	—	0,23
11	23,39	11,12	3,45	2,29	0,00	0,00	6,71	0,48	0,31	0,66	0,00	—	0,36
12	29,23	8,35	2,56	4,39	44,52	0,00	14,84	0,29	0,31	1,72	10,14	0,00	2,49
13	15,14	7,09	7,20	1,10	0,00	0,02	5,09	0,47	1,02	0,15	0,00	—	0,41
14	82,71	43,61	19,82	1,45	0,00	11,85	26,57	0,53	0,45	0,07	0,00	—	0,26
15	13,66	6,91	2,07	2,84	0,00	0,00	4,25	0,51	0,30	1,37	0,00	—	0,54
16	13,33	6,67	3,67	3,08	0,00	0,00	4,46	0,50	0,55	0,84	0,00	0,00	0,38
17	56,01	28,18	19,24	5,03	1,78	0,00	18,37	0,50	0,68	0,26	0,35	0,00	0,36
18	56,38	30,58	15,21	8,22	2,77	3,79	19,49	0,54	0,50	0,54	0,34	1,37	0,66
19	12,76	8,46	3,61	1,32	0,00	0,00	4,36	0,66	0,43	0,36	0,00	0,00	0,29
20	46,85	19,90	9,70	3,82	5,03	0,00	14,22	0,42	0,49	0,39	1,32	0,00	0,52

Le tableau révèle qu'en général, la longueur totale des segments de cours d'eau est maximale dans les cours d'eau de premier ordre et diminue au fur et à mesure que l'ordre des cours d'eau augmente.

III.3.7.2.1.4. Ratio de longueur du flux

Selon la loi d'Horton (1945), le rapport de longueur du flux (R_{lu}) des cours d'eau est le rapport entre la longueur moyenne d'un ordre (L_u) et d'un ordre inférieur (L_{u-1}), qui tend à être constante pendant les ordres successifs d'un bassin. Le rapport de longueur du flux entre les différents ordres des sous-bassins de l'oued Amtar montre un changement dans chaque sous-bassin versant. Les valeurs du R_{lu} varient de 0,24 à 2,49 pour les sous-bassins. Ce changement pourrait être attribué à la variation de la pente et de la topographie, des terrains drainés ce qui indique le stade tardif du développement géomorphologique du bassin versant (M.L. Waikar and Aditya P. Nilawar, 2014). Un rapport de longueur de flux plus élevé indique une activité érosive élevée.

III.3.7.2.1.5. Bifurcation Ratio

Le ratio de bifurcation est lié au schéma de ramification d'un réseau de drainage et peut être défini comme le rapport entre le nombre de segments de cours d'eau d'un ordre donné et le nombre de segments d'un ordre immédiatement supérieur (Schumm, 1956). Elle est également définie comme la valeur universelle pour les bassins hydrographiques (Rao et Babu, 1995).

Selon Strahler (1957), le rapport de bifurcation est démontré comme une propriété sans dimension et présente une faible plage de variation pour différentes régions ou différentes conditions environnementales, sauf lorsque la géologie domine. Le ratio moyen de bifurcation du sous-bassin de l'oued Amtar varie de 0,80 à 5,50.

Les résultats de l'analyse ont montré que le ratio moyen de bifurcation des sous-bassins versants de l'oued Amtar était variable pour tous les ordres (Tableau 11). Le développement géologique et lithologique du bassin versant peut-être la raison de ces variations. Une faible valeur moyenne de R_b indique une faible perturbation structurelle et les schémas de drainage n'ont pas été déformés (Strahler, 1964), tandis qu'une valeur moyenne élevée de R_b indique que la valeur de R_b est également révélatrice de la forme du bassin qui présente une perturbation structurelle.

Les irrégularités du bassin versant dépendent de l'évolution lithologique et géologique, ce qui entraîne des modifications des valeurs d'un ordre à l'autre. Un bassin allongé est susceptible d'avoir un R_b élevé, tandis qu'un bassin circulaire est susceptible d'avoir un R_b faible.

Tableau 11 : Bifurcation Ratio des sous-bassins de l'oued Amtar

Sous-bassins versants	Nombre de flux (Nu) d'ordre (u)						ΣNu	Rapport de					Rb moyen (Rbm)
	1	2	3	4	5	6		Tb1	Tb2	Tb3	Tb4	Tb5	
1	91	70	13	1	0	24	199	1,30	5,38	13,00	0,00	0,00	3,94
2	36	11	15	0	0	2	64	3,27	0,73	0,00	0,00	0,00	0,80
3	189	89	40	38	0	0	356	2,12	2,23	1,05	0,00	0,00	1,08
4	71	38	23	14	0	0	146	1,87	1,65	1,64	0,00	0,00	1,03
5	63	19	4	10	0	0	96	3,32	4,75	0,40	0,00	0,00	1,69
6	128	40	8	12	0	0	188	3,20	5,00	0,67	0,00	0,00	1,77
7	75	48	28	3	0	0	154	1,56	1,71	9,33	0,00	0,00	2,52
8	301	123	44	6	0	68	542	2,45	2,80	7,33	0,00	0,00	2,52
9	169	77	13	29	0	0	288	2,19	5,92	0,45	0,00	0,00	1,71
10	596	196	89	4	0	75	960	3,04	2,20	22,25	0,00	0,00	5,50
11	293	121	30	29	0	0	473	2,42	4,03	1,03	0,00	0,00	1,50
12	430	132	52	45	0	0	659	3,26	2,54	1,16	0,00	0,00	1,39
13	201	93	65	4	0	2	365	2,16	1,43	16,25	0,00	0,00	3,97
14	1044	434	152	16	0	111	1757	2,41	2,86	9,50	0,00	0,00	2,95
15	94	41	15	20	0	0	170	2,29	2,73	0,75	0,00	0,00	1,16
16	205	53	27	20	1	0	306	3,87	1,96	1,35	20,00	0,00	5,44
17	596	298	123	40	12	0	1069	2,00	2,42	3,08	3,33	0,00	2,17
18	629	312	145	72	15	18	1191	2,02	2,15	2,01	4,80	0,83	2,36
19	124	87	38	10	1	0	260	1,43	2,29	3,80	10,00	0,00	3,50
20	362	179	72	33	35	0	681	2,02	2,49	2,18	0,94	0,00	1,53
Bassin de	5697	2461	996	406	64	300	9924	48,20	57,28	97,24	39,08	0,83	2,43

III.3.7.2.1.6. Aspet de Forme

Divers phénomènes hydrologiques tels que la taille, la forme, la pente de la zone de drainage, la densité de drainage, la taille et la longueur des contributeurs peuvent être corrélés avec les caractéristiques physiographiques du bassin versant. L'aspect surfacique d'un bassin versant d'un ordre donné est défini comme la surface totale projetée sur un plan horizontal, contribuant à l'écoulement de surface dans le segment de canal de l'ordre donné, y compris tous les affluents d'ordre inférieur. La forme du bassin versant a un effet significatif sur les caractéristiques de l'écoulement des cours d'eau. Par exemple, on peut s'attendre à ce qu'un bassin hydrographique allongé ayant un taux de bifurcation élevé présente des débits de crue alternés. En revanche, un bassin versant rond ou circulaire avec un faible ratio de bifurcation peut présenter un débit de crue important.

La forme d'un bassin versant à une influence profonde sur le processus de ruissellement et de transport des sédiments. La forme du bassin versant régit également la vitesse à laquelle l'eau pénètre dans le cours d'eau (Rama, 2014). Pour l'analyse des aspects aréolaires, la connaissance des paramètres géométriques des bassins tels que la surface du bassin, le périmètre du bassin et la longueur du bassin sont les paramètres importants de la géomorphologie quantitative (K.Nookaratnam et.al, 2005 ; D.S. Deshmukh et.al, 2010 ; Benzougagh et al., 2022).

Les paramètres de forme d'un bassin versant sont : la densité de drainage (Dd), la texture de drainage (Td), la fréquence du flux (Fu), le facteur de forme (Ff), le rapport de circularité (Rc), le rapport d'élongation (Re), la longueur d'écoulement de surface (Lo), le coefficient de compacité (Cc) et le numéro de maintenance et d'infiltration du canal constant.

III.3.7.2.1.7. La densité de drainage (Dd)

La densité de drainage est l'un des autres éléments de l'analyse du drainage qui fournit une meilleure expression quantitative à la dissection et à l'analyse des formes de terrain, La densité du drainage (Dd), introduite par Horton (1932), est la longueur totale du réseau hydrographique par unité de surface d'un bassin versant. Elle s'exprime en km/km². Elle est contrôlée par plusieurs facteurs, notamment, la nature géologique des terrains, la capacité d'infiltration du sol et du sous-sol, les conditions climatiques et le couvert végétal du bassin (Humbert, 1990), qu'elle puisse en fin de compte être utilisée comme indicateur indirect pour expliquer ces variables, ainsi que la morphogenèse des formes de terrain (Benzougagh et al., 2023).

Une faible densité de drainage se produit généralement dans les zones où le sous-sol est très résistant ou perméable, où la végétation est dense et où le relief est peu marqué. Une densité de drainage élevée est le résultat d'un matériau souterrain faible ou imperméable, d'une végétation clairsemée et d'un relief montagneux. Une faible densité entraîne une texture de drainage grossière, tandis qu'une densité de drainage élevée entraîne une texture de drainage fine. La faible valeur de la densité de drainage favorise l'infiltration.

Dans le cadre de notre étude, nous avons examiné 20 sous-bassins versants dont la densité de drainage variait grandement, allant de 2,69 Km/Km² pour le sous-bassin versant (SUB-W04) à 7,38 Km/Km² pour le sous-bassin versant (SUB-W12). Cette importante fourchette de valeurs souligne l'hétérogénéité du réseau hydrographique dans la région étudiée et suggère des processus d'érosion et de ruissellement contrastés selon les sous-bassins.

III.3.7.2.1.8. Nombre d'infiltrations (In)

L'analyse morphométrique des bassins versants permet d'évaluer de nombreux paramètres caractérisant la géométrie et la structure des réseaux hydrographiques. Parmi ces paramètres, le nombre d'infiltrations (In) qui joue un rôle essentiel dans la compréhension du fonctionnement hydrologique d'un bassin. Comme l'ont souligné Romshoo et al. (2012), le nombre d'infiltrations (In) est le produit de la densité de drainage (Dd) et de la fréquence d'écoulement (Fs). Ce paramètre est inversement proportionnel à la capacité d'infiltration du bassin versant. Autrement dit, une valeur de nombre d'infiltrations (In) plus élevée indique une capacité d'infiltration plus faible, ce qui se traduira par un ruissellement de surface plus important (Umrikar, 2017).

L'analyse des résultats présentés dans le tableau x de la présente étude révèle que la valeur de (In) varie de manière significative entre les différents sous-bassins versants de l'oued Amtar. Elle oscille entre 54,33 (SUB-W01) et 403,22 (SUB-W12), soit près d'un facteur 8 entre le sous-bassin le plus favorable à l'infiltration et le moins favorable.

Ces écarts importants suggèrent que la majeure partie du bassin versant de l'oued Amtar présente une capacité d'infiltration relativement faible. Cela s'explique vraisemblablement par les caractéristiques physiques du bassin, à savoir la présence de formations géologiques peu perméables, un relief très accidenté ainsi qu'une lithologie globalement imperméable.

Ces conditions peu propices à l'infiltration ont pour conséquence de favoriser le ruissellement de surface, entraînant des écoulements rapides et potentiellement plus importants sur des durées plus courtes, comme le soulignent Bhatt et Ahmed (2014). Cela se traduit par une plus grande vulnérabilité du bassin aux crues soudaines et aux phénomènes d'érosion et de transport solide.

III.3.7.2.1.9. Longueur de l'écoulement de surface (Lo)

La longueur d'écoulement de surface (Lo) fait référence à la distance parcourue par l'eau hors du canal principal ou avant qu'elle ne s'écoule dans un chemin défini. Ce concept est étroitement lié à la longueur d'écoulement de la nappe. Selon la théorie d'Horton (1945), la longueur moyenne de l'écoulement de surface (Lo) est approximativement la moitié de l'inverse de la distance moyenne vers le bas (densité de drainage, Dd). La longueur d'écoulement de surface présente également une relation inverse avec la pente moyenne du bassin.

Dans le bassin versant de l'oued Amtar, les valeurs de Lo varient de manière significative entre les différents sous-bassins : Le sous-bassin hydrographique 04 a une valeur de Lo de 1,35 km/km², ce qui indique une pente raide et une voie d'écoulement plus courte. Cela entraîne un ruissellement plus élevé et une capacité d'infiltration réduite dans ce sous-bassin. À l'opposé, le sous-bassin hydrographique 12

Évaluation des risques d'érosion de surface et profonde à oued Amtar (Rif, Maroc)

a une valeur de Lo de 3,69 km/km², traduisant une pente plus douce et une voie d'écoulement plus étendue. Cela se traduit par un ruissellement plus faible dans ce sous-bassin, comme l'illustre la ([Figure 48](#)). Ces différences importantes de Lo entre les sous-bassins reflètent la diversité des caractéristiques physiques (pente, relief, réseau hydrographique) au sein du bassin versant de l'oued Amtar. Elles ont des implications directes sur les processus hydrologiques, avec des sous-bassins plus propices à l'infiltration et au stockage de l'eau, et d'autres davantage sujets au ruissellement rapide et à l'érosion.

III.3.7.2.1.10. Constante de maintien du canal ©

La constante d'entretien du canal © est un paramètre qui est l'inverse de la densité de drainage (Dd), comme l'a montré Schumm (1956). Cette constante indique l'infiltration et le contrôle du débit à la sortie du bassin. L'entretien constant du chenal dépend de plusieurs facteurs : le type et la perméabilité du substrat rocheux, le régime climatique, la couverture végétale, le relief, la durée de l'érosion et l'histoire climatique.

Une valeur C faible indique généralement une zone de dissection rapprochée, avec une perméabilité limitée et un réseau hydrographique peu développé. À l'inverse, une valeur C élevée suggère un bassin plus perméable, avec un réseau fluvial plus mature.

Dans le cas du bassin versant de l'oued Amtar : le sous-bassin versant 04 (SUB-W04) a une valeur C de 0,37, indiquant une structure rocheuse moins perméable, moins de perturbations structurelles, une maturité moindre et un ruissellement plus élevé. Le sous-bassin versant 12 (SUB-W12) a une valeur C de 0,14, suggérant une plus grande perméabilité, un réseau hydrographique plus développé et un ruissellement plus faible.

La valeur moyenne de C pour l'ensemble du bassin de l'oued Amtar est de 0,29 km², ce qui signifie qu'en moyenne, 0,49 km² de surface est nécessaire pour maintenir 1 km de réseau hydrographique ([Figure 32](#)). Ces différences de valeurs C entre les sous-bassins reflètent la diversité des caractéristiques physiques du bassin de l'oued Amtar, avec des implications importantes sur les processus hydrologiques et l'évolution du réseau de drainage.

III.3.7.2.1.11. Intensité du drainage (Din)

L'intensité de drainage (Din) est calculée comme le rapport entre la densité de drainage (Dd) et la fréquence d'écoulement (Fs) ([Faniran, 1968](#)) :

$$Din = Dd / Fs$$

Avec :

- **Dd** : représente la densité de drainage, qui reflète la longueur totale des cours d'eau par unité de surface du bassin.
- **Fs** : représente la fréquence d'écoulement, qui indique le nombre de cours d'eau par unité de surface du bassin.

Les valeurs de D_{in} permettent d'évaluer l'impact relatif de Dd et Fs sur les processus d'érosion et de ruissellement dans le bassin. Une faible valeur de D_{in} (proche de 0) indique que les effets de Dd et Fs sur les agents d'érosion du sol sont minimales. Cela suggère que d'autres facteurs, comme le climat, la topographie ou la couverture végétale, jouent un rôle plus important dans les processus d'érosion. À l'inverse, une valeur élevée de D_{in} (proche de 1 ou supérieure) indique une influence significative de Dd et Fs sur les agents d'érosion. Cela signifie que la densité et la fréquence des cours d'eau sont des facteurs prépondérants qui augmentent la sensibilité du bassin à l'érosion et au ruissellement.

Dans le cas du bassin de l'oued Amtar, les valeurs de D_{in} varient de 0,63 (dans le sous-bassin SUB-W19) à 1 (dans le sous-bassin SUB-W01). Cette large gamme de valeurs montre que l'impact de Dd et Fs sur l'érosion et le ruissellement n'est pas uniforme à l'échelle du bassin.

En effet, les sous-bassins avec les valeurs de D_{in} les plus élevées (proche de 1) sont particulièrement sensibles aux processus d'érosion et de génération du ruissellement. Cette hétérogénéité spatiale de l'intensité de drainage explique la vulnérabilité du bassin aux problèmes d'érosion par ravinement et d'inondations (*Figure 32*)

Ainsi, l'analyse des valeurs de D_{in} dans le bassin de l'oued Amtar met en évidence des zones plus critiques en termes de dynamique hydro-sédimentaire, en évaluant l'impact relatif des caractéristiques du réseau hydrographique sur la dynamique d'érosion et de ruissellement. Ces informations sont essentielles pour orienter les efforts de gestion et de conservation des sols à l'échelle du bassin.

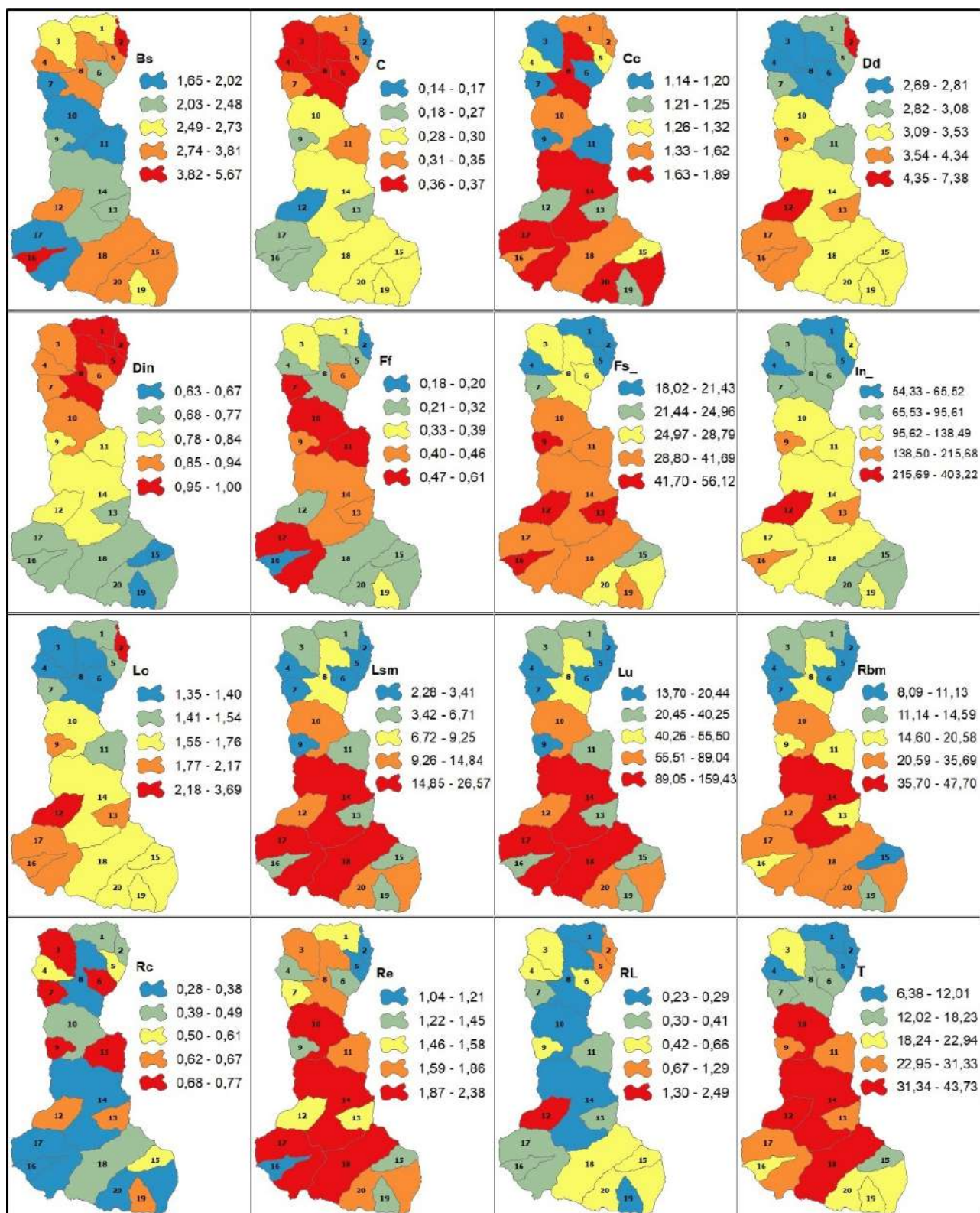


Figure 32 : Cartes des paramètres morphométriques dans le bassin versant de l'oued Amtar

Tableau 12 : Résultats de calcul par sous-bassin versant des paramètres morphométriques surfaciques du bassin de l'oued Amtar

Sous-bassins	Bs	Ff	Rc	Cc	Fs	T	Dd	In	Lo	C	Din	Re	RL	(LSM)	LU	Nu	Rbm
1	2,73	0,37	0,47	1,46	18,75	11,84	2,90	54,33	1,45	0,35	1,00	1,58	0,24	5,13	30,77	199	12,38
2	4,91	0,20	0,44	1,50	18,02	6,38	5,75	103,70	2,88	0,17	0,99	1,04	1,29	3,41	20,44	64	9,52
3	2,58	0,39	0,69	1,20	26,84	22,94	2,80	75,08	1,40	0,36	0,93	1,70	0,53	6,19	37,11	356	14,59
4	3,16	0,32	0,58	1,31	21,43	12,01	2,69	57,74	1,35	0,37	0,92	1,37	0,53	3,06	18,36	146	9,11
5	3,34	0,30	0,58	1,32	21,43	9,71	3,06	65,52	1,53	0,33	0,97	1,21	0,89	2,28	13,70	96	8,09
6	2,48	0,40	0,70	1,20	28,79	17,35	2,72	78,41	1,36	0,37	0,94	1,44	0,53	2,96	17,78	188	10,45
7	1,65	0,61	0,77	1,14	24,96	15,35	2,92	72,79	1,46	0,34	0,88	1,57	0,35	3,00	18,00	154	9,77
8	3,55	0,28	0,28	1,89	27,43	18,23	2,81	77,02	1,40	0,36	0,97	1,73	0,28	9,25	55,50	542	20,58
9	2,16	0,46	0,72	1,18	56,12	30,36	3,71	208,38	1,86	0,27	0,82	1,40	0,65	3,18	19,05	288	16,41
10	1,93	0,52	0,47	1,46	41,69	38,77	3,32	138,49	1,66	0,30	0,91	2,10	0,23	12,75	76,49	960	28,24
11	1,76	0,57	0,72	1,18	36,21	31,25	3,08	111,59	1,54	0,32	0,83	1,86	0,36	6,71	40,25	473	17,25
12	3,23	0,31	0,67	1,22	54,63	43,73	7,38	403,22	3,69	0,14	0,82	1,57	2,49	14,84	89,04	659	33,18
13	2,47	0,40	0,65	1,24	46,88	29,65	3,92	183,95	1,96	0,25	0,77	1,50	0,41	5,09	30,55	365	17,29
14	2,39	0,42	0,33	1,75	37,27	41,24	3,38	126,05	1,69	0,30	0,84	2,38	0,26	26,57	159,43	1757	47,70
15	3,32	0,30	0,61	1,28	22,53	13,63	3,38	76,12	1,69	0,30	0,67	1,38	0,54	4,25	25,48	170	11,13
16	5,67	0,18	0,38	1,62	49,67	21,51	4,34	215,68	2,17	0,23	0,73	1,15	0,38	4,46	26,75	306	17,04
17	2,02	0,49	0,32	1,77	36,11	31,33	3,72	134,45	1,86	0,27	0,76	2,21	0,36	18,37	110,24	1069	33,69
18	3,48	0,29	0,49	1,43	34,78	40,10	3,42	118,80	1,71	0,29	0,74	2,00	0,66	19,49	116,95	1191	35,69
19	2,70	0,37	0,64	1,25	35,07	21,60	3,53	123,67	1,76	0,28	0,63	1,45	0,29	4,36	26,15	260	13,82
20	3,81	0,26	0,29	1,87	27,63	20,67	3,46	95,61	1,73	0,29	0,71	1,80	0,52	14,22	85,31	681	26,12
Bassin de	59,34	7,44	10,8	28,27	666,24	477,65	72,29	2520,6	36,15	5,89	16,83	32,44	11,79	169,57	1017,35	9924	392,05

III.4. Matrice de corrélation des paramètres morphométriques pour les sous-bassins versants de l'oued Amtar.

L'analyse morphométrique des bassins versants implique généralement des paramètres qui sont fortement corrélés entre eux. La comparaison de ces paramètres montre qu'une partie de l'information contenue dans une variable est également présente dans d'autres variables. En particulier, la première composante principale capture la combinaison linéaire des variables d'origine qui explique le maximum de variance totale. La deuxième composante principale, orthogonale à la première, maximise la variance résiduelle jusqu'à ce que toute la variance soit analysée ([Tableau 12](#)).

Cette approche est plus appropriée lorsque les variables sont exprimées dans les mêmes unités ([Sharma et al., 2014](#) ; [Benzougagh et al., 2022](#)), car la variance totale dépend des unités de mesure. Il est donc courant de normaliser les variables, c'est-à-dire de les exprimer de manière à ce que leur variance soit égale à un. L'analyse est alors effectuée sur la matrice de corrélation, où la variance totale est égale au nombre de variables.

La matrice d'intercorrélation ([Tableau 13](#)) établie à partir de 11 paramètres morphométriques pour 20 sous-bassins de l'oued Amtar montre plusieurs relations fortes. On observe notamment une forte corrélation positive entre la densité de drainage, le nombre d'infiltration, le rapport de bifurcation et le rapport de longueur du cours d'eau. À l'inverse, le rapport de texture, l'intensité de la densité, le rapport de circularité et la constante de maintien du canal sont fortement et négativement corrélés à la plupart des autres paramètres.

Des corrélations élevées ($> 0,9$) sont également observées entre la longueur du cours d'eau et le nombre de cours d'eau, ainsi qu'avec le rapport de bifurcation. D'autres relations marquées ($> 0,8$) concernent la densité de drainage, le rapport de longueur du cours d'eau et le nombre d'infiltration, le rapport d'élongation, la longueur moyenne du cours d'eau et le rapport de bifurcation, ou encore la fréquence du cours d'eau et le nombre d'infiltration. Certains paramètres présentent des corrélations plus modérées ($> 0,6$), comme la texture de drainage avec le nombre d'infiltration, le rapport d'allongement avec la longueur moyenne du cours d'eau, ou le nombre d'infiltration avec le rapport de longueur du cours d'eau.

Ces résultats suggèrent que le regroupement des paramètres en composantes principales sera difficile, car il n'y a pas d'association significative évidente entre les variables.

Tableau 13 : Matrice de corrélation des paramètres morphométriques pour sous-bassins versants de l'oued Amtar.

	Bs	Ff	Rc	Cc	Fs	T	Dd	In	Lo	C	Din	Re	RL	Lsm	LU	Nu	Rbm
Bs	1																
Ff	-0,925	1															
Rc	-0,453	0,444	1														
Cc	0,381	-0,369	-0,981	1													
Fs	-0,095	0,156	0,128	-0,104	1												
T	-0,344	0,324	-0,039	0,055	0,754	1											
Dd	0,392	-0,347	-0,012	-0,027	0,448	0,292	1										
In	0,124	-0,093	0,119	-0,119	0,843	0,625	0,822	1									
Lo	0,392	-0,347	-0,011	-0,028	0,448	0,291	1,000	0,822	1								
C	-0,415	0,329	0,095	-0,047	-0,525	-0,330	-0,943	-0,784	-0,943	1							
Din	-0,067	0,062	0,019	-0,036	-0,425	-0,351	-0,142	-0,311	-0,141	0,329	1						
Re	-0,534	0,485	-0,358	0,404	0,168	0,699	-0,226	-0,018	-0,227	0,188	-0,134	1					
RL	0,282	-0,339	0,210	-0,234	0,237	0,166	0,856	0,680	0,857	-0,679	0,080	-0,301	1				
Lsm	-0,123	0,062	-0,553	0,565	0,262	0,739	0,164	0,250	0,163	-0,195	-0,239	0,850	0,049	1			
LU	-0,022	0,008	-0,104	0,103	0,049	0,139	0,032	0,047	0,032	-0,052	-0,048	0,158	0,009	0,188	1		
Nu	-0,043	0,032	-0,104	0,103	0,067	0,161	0,010	0,042	0,010	-0,038	-0,050	0,181	-0,020	0,200	0,999	1	
Rbm	-0,129	0,085	-0,493	0,508	0,453	0,840	0,248	0,408	0,247	-0,290	-0,288	0,818	0,092	0,978	0,184	0,199	1

III.5. Priorisation des sous-bassins versants de l'oued Amtar

La priorisation des sous-bassins versants a pour objectif principal d'assurer une gestion plus efficace et ciblée des ressources en eau et de la lutte contre l'érosion à l'échelle du bassin versant (Suresh et al., 2004 ; Gajbhiye et al., 2013 ; Benzougagh et al., 2022). Tout d'abord, cette démarche vise à identifier les zones les plus vulnérables. Il s'agit de déterminer quels sont les sous-bassins les plus exposés aux risques d'érosion et de ruissellement important, ainsi que de cibler les secteurs où les dynamiques hydrologiques sont les plus marquées.

Ensuite, l'objectif est de permettre une meilleure planification et priorisation des interventions. En concentrant les actions de gestion des eaux et des sols sur les sous-bassins prioritaires, en allouant de manière optimale les ressources financières et humaines, et en définissant un plan d'action hiérarchisé à l'échelle du bassin versant, il est possible d'améliorer l'efficacité des moyens mis en œuvre.

De plus, la priorisation des sous-bassins vise à améliorer la gestion intégrée des ressources en eau. Cela passe par une meilleure compréhension du fonctionnement hydrologique du bassin dans son ensemble, en favorisant une approche globale et cohérente de la gestion de l'eau. Ainsi, il devient plus aisé

Évaluation des risques d'érosion de surface et profonde à oued Amtar (Rif, Maroc)

Apport des outils géomatiques et de machine Learning

d'anticiper et de prévenir les problèmes liés aux ressources en eau, comme les crues, les étiages ou la pollution.

Enfin, cette démarche inclut un volet de suivi et d'évaluation des actions entreprises. Il s'agit d'identifier des indicateurs de suivi pertinents pour chaque sous-bassin prioritaire, d'évaluer l'efficacité des interventions mises en place, et d'ajuster le plan d'action en fonction des résultats observés.

Dans la présente étude du bassin versant de l'oued Amtar, le bassin a été subdivisé en vingt sous-bassins distincts afin d'adopter une approche plus ciblée et systématique pour prioriser et gérer ses différentes composantes. Cela était nécessaire compte tenu des contraintes pratiques liées à la prise en compte de l'ensemble du bassin ou à l'évaluation des priorités à l'échelle régionale.

Dans la présente étude, le processus de priorisation a été mené en fonction de paramètres morphométriques, linéaires et de forme (*Tableau 14*), car ces paramètres sont étroitement liés à l'érosion des sols et à l'état général des eaux de surface et souterraines (Suresh et al., 2004 ; Benzougagh et al., 2017). Les 20 sous-bassins versants ont été classés en quatre catégories de priorité distinctes en fonction de la valeur de leurs paramètres composés (CP). Les sous-bassins de priorité faible ont une valeur de 13,18, ceux de priorité modérée ont des valeurs comprises entre 11,18 et 11,94, ceux de priorité élevée ont des valeurs entre 10 et 10,88, et ceux de très haute priorité ont des valeurs entre 8,41 et 9,88.

Ce système de classification permet d'orienter les efforts d'allocation et de gestion des ressources vers les sous-bassins versants qui en ont le plus besoin, en accordant la plus haute priorité aux zones les plus problématiques (*Figure 33*).

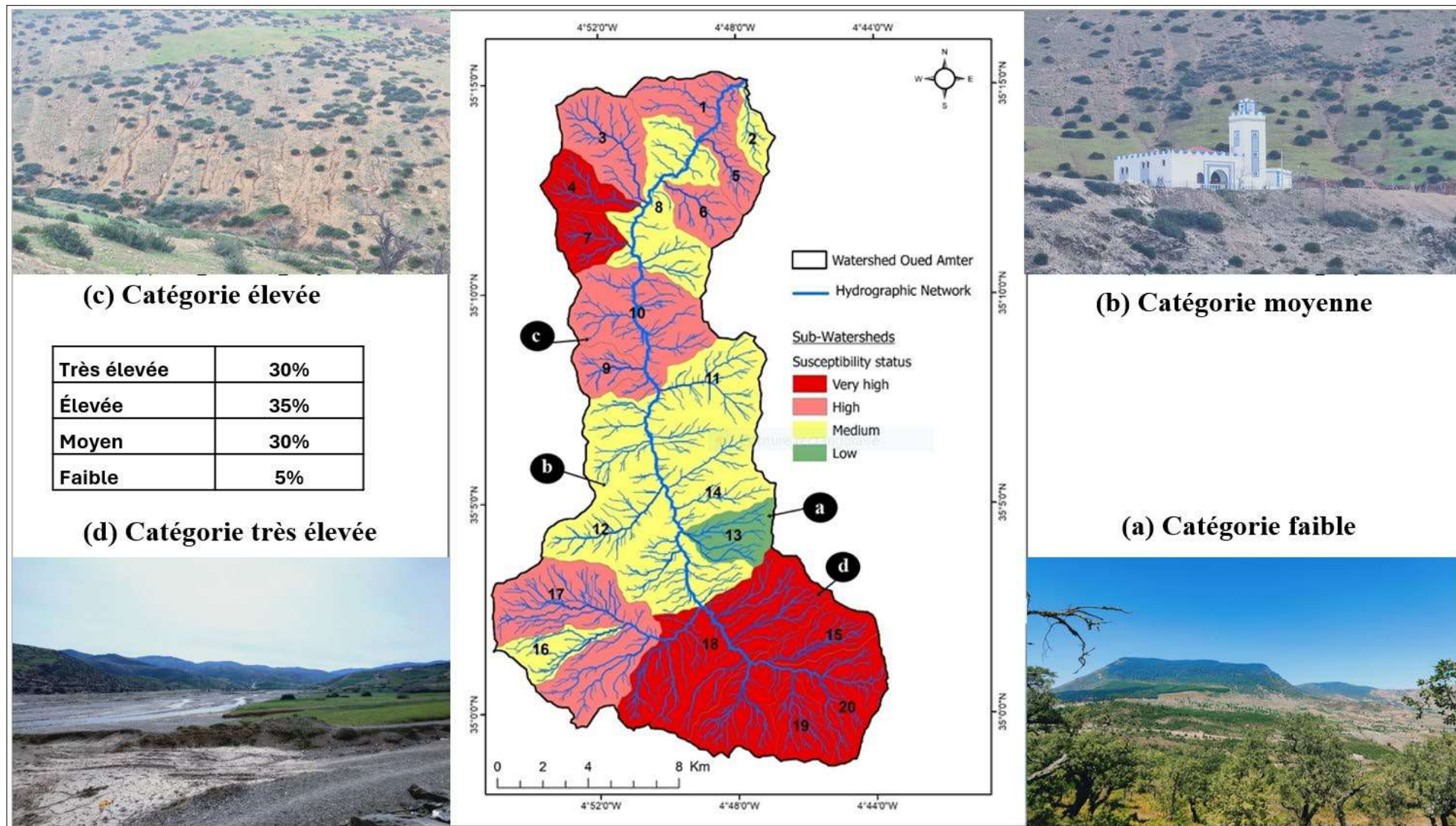


Figure 33 Carte de priorisation des sous-bassins versants de l'oued Amtar

Tableau 14 : Classements hiérarchisés des sous-bassins versants à l'aide de paramètres morphométriques.

Sous-bassins versants	T	Fs	C	Dd	Lo	Din	Ff	In	Bs	Cc	Rc	RL	Lsm	Re	Lu	Nu	Rbm	Paramètre composé	Classement prioritaire	Priorité finale	Statut de susceptibilité
1	3	2	16	5	5	20	10	1	11	13	7	19	14	2	14	14	14	10,00	7	2	Elevée
2	1	1	2	19	19	19	2	10	19	15	6	2	18	16	18	18	18	11,94	19	3	Moyenne
3	12	7	17	3	3	15	12	5	9	4	16	7	17	5	17	17	17	10,76	10	2	Elevée
4	4	3	19	1	1	14	9	2	12	10	10	8	12	4	12	10	12	8,41	1	1	Très élevée
5	2	4	14	7	7	17	6	3	15	11	11	3	20	15	20	20	10	10,88	13	2	Elevée
6	7	10	20	2	2	16	13	8	8	5	17	9	10	9	10	12	20	10,47	8	2	Elevée
7	6	6	15	6	6	12	20	4	1	1	20	15	8	6	8	8	8	8,82	4	1	Très élevée
8	8	8	18	4	4	18	4	7	17	20	1	17	11	19	11	11	13	11,24	15	3	Moyenne
9	14	20	5	15	15	8	16	18	5	2	18	5	3	13	3	13	11	10,82	11	2	Elevée
10	17	16	10	9	9	13	18	16	3	14	8	20	1	7	1	3	16	10,65	9	2	Elevée
11	15	14	13	8	8	10	19	11	2	3	19	13	13	12	13	16	9	11,65	18	3	Moyenne
12	20	19	1	20	20	9	8	20	13	6	15	1	16	1	16	9	3	11,59	17	3	Moyenne
13	13	17	4	17	17	7	14	17	7	7	14	11	19	3	19	19	19	13,18	20	4	Faible
14	19	15	11	10	10	11	15	14	6	17	4	18	15	8	15	1	1	11,18	14	3	Moyenne
15	5	5	12	11	11	2	7	6	14	9	12	6	2	20	2	6	15	8,53	2	1	Très élevée
16	10	18	3	18	18	4	1	19	20	16	5	12	9	11	9	15	6	11,41	16	3	Moyenne
17	16	13	6	16	16	6	17	15	4	18	3	14	4	18	4	7	7	10,82	12	2	Elevée
18	18	11	8	12	12	5	5	12	16	12	9	4	7	10	7	4	2	9,06	5	1	Très élevée
19	11	12	7	14	14	1	11	13	10	8	13	16	6	17	6	5	4	9,88	6	1	Très élevée
20	9	9	9	13	13	3	3	9	18	19	2	10	5	14	5	2	5	8,71	3	1	Très élevée

III.6. Validation des résultats de l'analyse morphométrique

La validation des résultats obtenus par l'analyse morphométrique des sous-bassins versants de l'oued Amtar s'appuie sur plusieurs éléments. Tout d'abord, la méthodologie employée, basée sur l'étude des paramètres linéaires et de forme, est reconnue dans la littérature scientifique comme une approche pertinente pour évaluer les risques d'érosion et d'inondation à l'échelle d'un bassin versant. Les indicateurs morphométriques sélectionnés, tels que la pente, le drainage et la forme, ont en effet été identifiés comme étant étroitement liés aux dynamiques hydrologiques et d'érosion des sols.

Par ailleurs, la classification en plusieurs catégories de priorité, allant de « faible » à « très élevée », permet une représentation synthétique et opérationnelle des résultats, facilitant ainsi leur appropriation par les gestionnaires. La cartographie des priorités offre également une visualisation claire des zones les plus sensibles à l'échelle du bassin versant de l'oued Amtar.

Enfin, les résultats obtenus semblent cohérents avec les connaissances du terrain et les enjeux identifiés dans cette zone d'étude (*Figure 33*), renforçant ainsi leur pertinence pour guider les actions de gestion intégrée des ressources en sol et eau et de lutte contre l'érosion hydrique.

III.7. Conclusions

L'analyse morphométrique des vingt (20) sous-bassins versants de l'oued Amtar a permis d'identifier clairement les zones les plus vulnérables en termes de risque d'érosion hydrique. Les résultats obtenus sont sans équivoque : les sous-bassins 4, 7, 15, 18, 19 et 20 présentent une vulnérabilité très élevée au risque d'érosion hydrique (30 % de la surface du bassin versant), tandis que les sous-bassins 1, 3, 5, 6, 9, 10 et 17 sont classés en catégorie élevée (35 % de la surface totale du bassin versant de l'oued Amtar). Cette répartition spatiale des priorités montre que la zone d'étude est fragile et très vulnérable au risque d'érosion. Elle met en lumière les secteurs nécessitant une attention particulière et des actions d'urgence de gestion prioritaires.

Les sous-bassins identifiés en priorité « très élevée » et « élevée » se caractérisent par des paramètres morphométriques particulièrement défavorables, tels qu'une pente importante, un réseau de drainage dense et une forme allongée. Ces caractéristiques favorisent les phénomènes d'écoulement concentré et d'érosion hydrique, accentuant ainsi la vulnérabilité de ces zones.

A l'inverse, les sous-bassins classés en priorité moyenne sont 2, 8, 11, 12, 14 et 16 qui représente 30 % de la surface totale du bassin. La catégorie faible est attribuée au sous bassin versant 3, il représente 5% de la surface du bassin versant, présentent des indicateurs morphométriques plus équilibrés, les rendant

moins sensibles aux processus érosifs. Ces secteurs devront néanmoins faire l'objet d'un suivi attentif, afin de prévenir toute dégradation future.

Ces résultats constituent une base de connaissances solide pour orienter la mise en œuvre d'une gestion intégrée et durable du bassin versant de l'oued Amtar. Ils permettront notamment de cibler prioritairement les interventions de lutte contre l'érosion, de restauration des écosystèmes et de protection des ressources en eau et sol. Une approche concertée, impliquant l'ensemble des acteurs du territoire, sera essentielle pour assurer l'efficacité et la pérennité de ces actions.

Au-delà de cette application immédiate, l'analyse morphométrique réalisée ici pourrait également être reproduite sur d'autres bassins versants présentant des enjeux similaires, contribuant ainsi à une meilleure connaissance et gestion des milieux hydrologiques à l'échelle régionale.

Conclusion du chapitre III

L'analyse morphométrique des vingt (20) sous-bassins versants de l'oued Amtar a permis d'identifier clairement les zones les plus vulnérables en termes de risque d'érosion hydrique. Les résultats obtenus sont sans équivoque : les sous-bassins 4, 7, 15, 18, 19 et 20 présentent une vulnérabilité très élevée au risque d'érosion hydrique (30 % de la surface du bassin versant), tandis que les sous-bassins 1, 3, 5, 6, 9, 10 et 17 sont classés en catégorie élevée (35 % de la surface totale du bassin versant de l'oued Amtar). Cette répartition spatiale des priorités montre que la zone d'étude est fragile et très vulnérable au risque d'érosion. Elle met en lumière les secteurs nécessitant une attention particulière et des actions d'urgence de gestion prioritaires.

Les sous-bassins identifiés en priorité « très élevée » et « élevée » se caractérisent par des paramètres morphométriques particulièrement défavorables, tels qu'une pente importante, un réseau de drainage dense et une forme allongée. Ces caractéristiques favorisent les phénomènes d'écoulement concentré et d'érosion hydrique, accentuant ainsi la vulnérabilité de ces zones.

A l'inverse, les sous-bassins classés en priorité moyenne sont 2, 8, 11, 12, 14 et 16 qui représente 30 % de la surface totale du bassin. La catégorie faible est attribuée au sous bassin versant 3, il représente 5% de la surface du bassin versant, présentent des indicateurs morphométriques plus équilibrés, les rendant moins sensibles aux processus érosifs. Ces secteurs devront néanmoins faire l'objet d'un suivi attentif, afin de prévenir toute dégradation future.

Ces résultats constituent une base de connaissances solide pour orienter la mise en œuvre d'une gestion intégrée et durable du bassin versant de l'oued Amtar. Ils permettront notamment de cibler prioritairement les interventions de lutte contre l'érosion, de restauration des écosystèmes et de protection des ressources en eau et sol. Une approche concertée, impliquant l'ensemble des acteurs du territoire, sera essentielle pour assurer l'efficacité et la pérennité de ces actions.

Au-delà de cette application immédiate, l'analyse morphométrique réalisée ici pourrait également être reproduite sur d'autres bassins versants présentant des enjeux similaires, contribuant ainsi à une meilleure connaissance et gestion des milieux hydrologiques à l'échelle régionale.

CHAPITRE IV : ÉVALUATION DU RISQUE DE L'ÉROSION HYDRIQUE DANS LE BASSIN VERSANT DE L'OUED AMTAR A L'AIDE DE LA METHODE EPM

Résumé du chapitre IV

La dégradation des sols est une préoccupation environnementale majeure, posant de sérieux défis à l'agriculture durable et à la gestion des terres. La région du Nord-Est du Maroc est particulièrement sujette à l'érosion des sols, en raison d'une combinaison de facteurs, notamment la topographie, la géomorphologie, la géologie, le climat et les pratiques d'utilisation des terres. Ce travail présente une méthode d'évaluation du potentiel d'érosion (EPM) basée sur les systèmes d'information géographique (SIG), conçue pour évaluer la dégradation des sols dans le bassin de l'oued Amtar, dans le Nord-Est du Maroc.

Cette étude a développé un modèle exhaustif d'évaluation des risques d'érosion en intégrant diverses données spatiales, telles que la topographie, les précipitations, la couverture terrestre et les propriétés des sols. Les résultats révèlent que la perte de sol varie considérablement, allant de 55,91 à 44 088,33 m³/km²/an dans le bassin de l'oued Amtar. Ces conclusions soulignent l'urgence de s'attaquer à la conservation des sols et à la planification de l'utilisation des terres dans la région. Les résultats de l'EPM peuvent aider les décideurs, les gestionnaires de terres et les chercheurs à prendre des décisions éclairées et à mettre en œuvre des mesures efficaces pour protéger les sols et promouvoir des pratiques d'utilisation des terres durables.

Mots-clés : Érosion hydrique, EPM, SIG, dégradation des sols, Bassin d'oued Amtar, Maroc.

IV.1. Introduction

L'érosion hydrique est une cause majeure de la dégradation des sols dans le monde entier et constitue un problème environnemental important depuis des siècles (Eswaran et al. 2019 ; Bag et al. 2022 ; Benzougagh et al. 2022 ; Bammou et al., 2023a). L'érosion hydrique se définit comme le détachement et le transport de particules de sol par l'eau. L'érosion hydrique se produit lorsque les précipitations, la fonte des neiges ou l'eau d'irrigation frappent la surface du sol, entraînant le détachement, le transport et le dépôt de particules de sol ailleurs (Morgan 2009 ; Benzougagh et al., 2016 ; Ougougdal et al. 2020 ; Elliot et Flanagan 2023 ; Mehwish et al., 2024). Les impacts de l'érosion hydrique sont importants et comprennent l'épuisement des nutriments du sol, la réduction des rendements des cultures et l'augmentation de la sédimentation dans les masses d'eau. L'érosion hydrique menace considérablement la productivité agricole et la durabilité environnementale (Al-Quraishi 2003 ; Benzougagh et al. 2017 ; 2020 ; Bazhenova et al. 2022). Plusieurs facteurs influencent le taux et l'étendue de l'érosion hydrique, notamment l'intensité des précipitations, le type de sol, l'inclinaison des pentes, le couvert végétal et l'utilisation des terres. L'intensité des précipitations détermine la quantité d'eau qui atteint la surface du sol et affecte le taux d'érosion (Zhao et Hou, 2019 ; Benzougagh et al. 2020 ; Neupane et al. 2023 ; Chen et al. 2023).

Les sols à faible taux d'infiltration sont plus sensibles à l'érosion hydrique car ils ne peuvent pas absorber de grandes quantités d'eau, ce qui entraîne un ruissellement de surface et un détachement du sol. L'inclinaison de la pente influe sur la vitesse du ruissellement de surface, les pentes les plus raides entraînant un écoulement plus rapide de l'eau, ce qui accroît les taux d'érosion. La couverture végétale joue un rôle crucial dans la protection de la surface du sol contre l'érosion hydrique en réduisant l'impact des précipitations et en augmentant les taux d'infiltration (Liu et al. 2020 ; El Brahimi et al. 2022 ; Hossini et al. 2022 ; Singh et al. 2023). Enfin, l'utilisation des terres et les pratiques de gestion telles que le travail du sol, la rotation des cultures et le pâturage peuvent exacerber ou atténuer l'érosion hydrique (Wassie 2020 ; Ghosh et al. 2022 ; Van Huyssteen & du Preez 2023).

Diverses pratiques de gestion, notamment le labour de conservation, le terrassement, l'agriculture en courbes de niveau, les cultures de couverture et l'agroforesterie, peuvent être mises en œuvre pour prévenir ou atténuer l'érosion hydrique. Ces pratiques visent à réduire le ruissellement de surface et le détachement du sol, à augmenter les taux d'infiltration et à protéger la surface du sol des effets de la pluie. L'efficacité de ces pratiques varie en fonction des conditions pédologiques et climatiques locales, mais il a été démontré qu'elles réduisaient considérablement les taux d'érosion hydrique. L'évaluation des risques d'érosion hydrique est essentielle pour identifier les zones vulnérables à l'érosion hydrique et pour mettre en œuvre des pratiques de gestion appropriées afin de prévenir ou d'atténuer l'érosion (Al-Quraishi 2004 ; Mihi et al. 2020 ; Kebede et al. 2023 ; Hagras 2023). Plusieurs méthodes ont été

développées pour évaluer le risque d'érosion hydrique, allant d'approches empiriques à des approches de modélisation.

Méthodes empiriques

Les méthodes empiriques impliquent l'utilisation de techniques simples sur le terrain pour évaluer le risque d'érosion hydrique en fonction de la présence ou de l'absence de facteurs spécifiques qui influencent les taux d'érosion. L'une des méthodes empiriques les plus courantes est l'équation universelle de perte de sol (USLE) (Uddin et al. 2018 ; Talchabhadel et al. 2020 ; Kader et al. 2022 ; Kumar et al. 2023), qui estime la perte annuelle moyenne de sol due à l'érosion hydrique en fonction de six facteurs clés : les précipitations, l'érodabilité du sol, la longueur et l'inclinaison de la pente, le couvert végétal et les pratiques de gestion. D'autres méthodes empiriques comprennent l'équation universelle révisée de perte de sol (RUSLE), le modèle Morgan-Morgan-Finney (MMF) et le projet de prévision de l'érosion hydrique (WEPP) (Zema et al. 2020 ; Svoray 2022 ; Halder 2023).

Méthodes de modélisation :

Les méthodes de modélisation utilisent des modèles informatiques pour simuler les taux d'érosion et identifier les zones à haut risque d'érosion (Girma et Gebre 2020 ; Bagheri et al. 2023). Ces méthodes nécessitent la saisie de nombreuses données, y compris les données pluviométriques, les propriétés du sol, la topographie, le couvert végétal et les pratiques de gestion. L'une des méthodes de modélisation les plus utilisées est l'outil d'évaluation des sols et de l'eau (SWAT), qui simule les processus d'érosion hydrique à l'échelle du bassin versant en intégrant les processus hydrologiques, agricoles et environnementaux (Wang et al. 2019 ; A'oko et al. 2021 ; Aloui et al. 2023). D'autres méthodes de modélisation comprennent la méthode SWAT révisée (SWAT+) (Yen et al. 2019 ; Senent-Aparicio et al. 2021 ; Llanos-Paez et al. 2023), et l'outil d'évaluation des sols et de l'eau avec informations géospatiales (SWAT-G) (Meshesha et al. 2021 ; Föeger et al. 2022 ; El Ghouli et al. 2023), et Water Erosion Prediction Project model for arid and semiarid lands (WEPPAL) (Chen et al. 2021 ; Li et al. 2022 ; Gao et al. 2023).

Méthodes de télédétection :

Les méthodes de télédétection impliquent l'utilisation d'images satellitaires ou aériennes pour identifier les zones présentant un risque élevé d'érosion hydrique sur la base d'indicateurs spécifiques (Schaefer et Thinh 2019 ; Cerbelaud et al. 2022 ; Danchenkov et al. 2023), notamment la couverture végétale, l'humidité du sol et la topographie. Ces méthodes constituent une approche rapide et rentable pour évaluer le risque d'érosion sur de vastes zones, mais nécessitent un étalonnage et une validation par rapport aux données de terrain. Parmi les méthodes de télédétection les plus couramment utilisées pour l'évaluation du risque d'érosion hydrique figurent l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) (Almagro et al. 2019 ; Sharma et al. 2021 ; De Oliveira Oliveira et al. 2023), l'indice de

végétation ajusté au sol (SAVI) et l'indice d'humidité topographique (TWI) (Berhanu et al. 2018 ; Zhi et al. 2021 ; Das et al. 2023).

L'érosion des sols est un problème urgent dans de nombreuses régions du monde, et le Rif au Maroc ne fait pas exception. Le Rif est une région montagneuse du nord du Maroc, où se trouve la zone d'étude, connue pour sa riche culture et ses paysages variés (El Brahimi et al. 2022 ; Kader et al., 2023b). Cependant, cette région est confrontée à la menace de l'érosion des sols due à divers facteurs naturels et anthropogéniques. L'érosion des sols est un processus au cours duquel la couche supérieure du sol est enlevée par le vent, l'eau ou d'autres agents, ce qui entraîne la perte de nutriments précieux et la dégradation des terres (Fartas et al. 2022 ; Kader et al., 2023a). Dans les cas extrêmes, ce processus peut entraîner une réduction de la productivité agricole, une perte de biodiversité et la désertification.

Dans le RIF, l'érosion des sols est une préoccupation majeure en raison de la topographie unique de la région, de la fragilité des écosystèmes et de la surexploitation des terres pour l'agriculture et la sylviculture (Benzougagh et al. 2022 ; Lamane et al. 2022). Il est donc essentiel de comprendre les causes et les impacts de l'érosion des sols dans le RIF et de mettre en œuvre des stratégies efficaces pour atténuer le problème et garantir des pratiques d'utilisation des terres durables pour les générations futures.

L'objectif de cette étude était d'utiliser le model potentiel d'érosion (EPM) dans le bassin versant de l'oued Amtar, situé dans le Rif au Maroc. L'EPM est une méthode empirique utilisée pour évaluer le risque d'érosion hydrique en fonction de la présence ou de l'absence de facteurs spécifiques qui influencent les taux d'érosion (Pandey et al. 2021 ; Micić Ponjiger et al. 2023). Il s'agit d'une méthode relativement simple et rentable qui peut être utilisée pour évaluer le potentiel d'érosion à différentes échelles, des petits bassins versants aux plus grands. L'EPM est basé sur des critères qui évaluent l'érodabilité du sol, la couverture végétale, la longueur et l'inclinaison des pentes, ainsi que le climat. Ces critères sont notés sur une échelle de 0 à 10, les notes les plus élevées indiquant un potentiel d'érosion plus important (Pourghasemi et al. 2019 ; Abbate et al. 2023). Les scores de chaque critère sont ensuite multipliés pour obtenir un seul indice de potentiel d'érosion, qui peut être utilisé pour identifier les zones à potentiel d'érosion élevé, modéré et faible.

Les résultats de l'EPM peuvent être utilisés pour identifier les zones à potentiel d'érosion élevé, modéré et faible, et peuvent être superposés sur des cartes pour fournir des représentations visuelles du risque d'érosion. Les résultats peuvent également être utilisés pour donner la priorité à des mesures de contrôle de l'érosion telles que la plantation de végétation, la construction de terrasses ou de bermes, ou la mise en œuvre de pratiques culturales de conservation. Outre l'identification des zones à risque d'érosion, l'EPM peut également être utilisé pour suivre l'évolution du potentiel d'érosion au fil du temps. En utilisant l'EPM pour évaluer le potentiel d'érosion avant et après la mise en œuvre de pratiques de

contrôle de l'érosion, ainsi que les gestionnaires fonciers peuvent évaluer l'efficacité de ces pratiques et procéder aux ajustements nécessaires.

Cependant, il est essentiel de noter que l'EPM ne fait qu'estimer le potentiel d'érosion et ne prend pas en compte les interactions complexes entre les différents facteurs qui influencent les taux d'érosion, tels que les pratiques d'utilisation des terres, la gestion des sols et la variabilité du climat. Elle doit donc être combinée à d'autres méthodes d'évaluation du risque d'érosion, aux connaissances locales et à l'expérience. Dans l'ensemble, la méthode du potentiel d'érosion est un outil précieux pour évaluer le risque d'érosion hydrique et identifier les zones qui nécessitent des pratiques de gestion pour prévenir ou atténuer l'érosion. Il s'agit d'une méthode relativement simple et rentable que les gestionnaires des terres et les décideurs politiques peuvent utiliser pour hiérarchiser les efforts de lutte contre l'érosion de manière rentable.

IV.2. Les Paramètres D'entrée du Modèle EPM

Plusieurs modèles ont été développés pour estimer l'érosion des sols de point de vue qualitative et quantitative. L'un des plus importants d'entre eux est le modèle d'érosion de Gavrilovic ou la méthode du potentiel d'érosion (EPM). Cette approche est unique en son genre, où, le facteur thermique est inclus comme paramètre supplémentaire pour évaluer l'érosion hydrique.

Le modèle EPM a été conçu au départ spécialement pour les secteurs montagnards dont l'objectif est d'atteindre un niveau de souplesse et de performance acceptable en termes de quantification des pertes en terre (Gavrilovic, 1988 ; Globevnik, 2003 ; Chaaouan et al, 2013 ; Lakhili, 2018 ; EL-Bouhali et al, 2019 ; Zahnoun et Al Karkouri, 2020 ; El Brahimi et al., 2024).

La méthode a pour objectif de quantifier les risques d'érosion hydrique et de développer des pratiques adaptées pour la réduction des pertes des sols. Elle est applicable à divers types d'érosion (érosion en nappes, érosion en rigoles et en ravins et sapement de berges).

L'application de ce modèle est basée sur plusieurs variables (pente, couvert végétal, lithologie, précipitations et température), mais il est basé sur trois paramètres : le coefficient de la température, le coefficient des précipitations et le coefficient d'érosion qui, de son côté, est déterminé par la pente, le taux de recouvrement végétal et la sensibilité du sol à l'érosion. En effet, les résultats sont obtenus à travers l'application d'une série d'équations intégrant les différents aspects qualitatif et quantitatif de milieu naturel dans un système d'information Géographique (SIG).

Nous allons tester ce modèle pour la quantification de l'érosion dans les sous bassins versants de l'oued Amtar, sachant que toutes les données sur les paramètres du modèle et la similitude des conditions physiques du bassin versant sont disponibles.

Dans ce chapitre, L'application du modèle de Gavrilović a nécessité la cartographie et l'intégration dans le Système d'Information Géographique (SIG) des différents paramètres qui rentrent en ligne dans le phénomène de l'érosion hydrique et qui sont nécessaire au fonctionnement du modèle EPM. Ce couplage permet, d'évaluer les pertes en sols et d'estimer le poids de chaque variable et de leurs effets combinés d'une manière rapide et efficace. Il permet ainsi de démêler la complexité et l'interdépendance des facteurs responsables de l'érosion. L'équation exprime l'érosion comme étant le produit des six paramètres suivants : les pentes, les précipitations, les températures, la sensibilité des sols à l'érosion, les types d'érosion et la protection des sols, ces paramètres utilisés ont été étudiés grâce à la télédétection et aux données collectées sur le terrain puis intégrés dans un système SIG. Ces paramètres sont : des paramètres permanents de l'érosion hydrique (la sensibilité à l'érosion, la pente et l'état érosif) ; des paramètres dynamiques (les précipitations ; les températures ; l'occupation des sols) et des paramètres liés aux processus et formes de l'érosion réelle et leur hiérarchisation en fonction du degré du risque.

IV.3. Méthodologie d'application du modèle d'érosion potentielle de Gavrilovic (EPM).

Le volume annuel moyen des sédiments érodés désigné par la lettre (W) est déterminé de la manière suivante :

$$W_{EPM} = T * H * \pi * \sqrt{Z^3}$$

Avec :

- **W** : Estimation des pertes moyennes annuelles des sols (m³ /km²/an). Les valeurs seront converties par la suite en t/h/an afin de faciliter la comparaison avec le modèle MUSLE.
- **T** : Coefficient de température, exprimé comme suit :

$$T = \sqrt{\left(\frac{t_0}{10} + 0.1\right)}$$

Avec

- **t₀** : température moyenne annuelle en °C.
- **H** : Précipitation moyenne annuelle en (mm).
- **Z** : Coefficient d'érosion qui s'exprime comme suit :

$$Z = Xa * Y * (\varphi + \sqrt{Ja})$$

Avec :

- **Xa** : Coefficient de protection du sol du bassin versant, se rapportant à la protection des sols par la couverture végétale, des influences des phénomènes atmosphériques des forces érosives liées aux conditions naturelles.
- **Y** : Coefficient d'érosion du sol, indique la sensibilité des sols à l'érosion dépend de la géologie du bassin versant

- ϕ : Coefficient de type et d'étendue de l'érosion équivalant numérique des processus visibles et nettement prononcés dans le bassin versant
- Ja : Pente moyenne de la zone d'étude en (%) L'organigramme (Figure (III.1) présente la méthodologie adoptée pour préparer la carte des pertes en sols (W) à partir du modèle de Gavrilovic (EPM).

Pour les valeurs de Y et Xa , elles sont extraites des tableaux faits par Gavrilovic en 1954 et modifiés plus tard par un groupe de chercheurs Stefanovic, M. et al., en2004 et Zorn M. & Komac B. en 2005. Le modèle de Gavrilovic dépend d'un grand nombre de données relatives à la lithologie des sols, à la pente et à la végétation. Dans cette étude, nous avons adopté des techniques de télédétection pour la réalisation des cartes de la couverture végétale et de la température de sol au niveau du bassin versant de l'oued Amtar. Pour estimer l'érosion potentielle, l'équation du coefficient Z a été intégrée dans les systèmes d'information géographique (SIG) sous forme des cartes thématiques des différents paramètres d'équation afin de réaliser un ensemble de fonctions d'analyse spatiale.

L'intégration des éléments de cette équation dans le système d'information géographique a permis de mettre en évidence les relations entre les facteurs qui contrôlent l'érosion hydrique et de faciliter l'inventaire des ressources ainsi que la connaissance des changements du milieu. Pour préparer les différents paramètres du modèle conformément au plan (*Figure 34 et Figure 35*), on s'est basé sur quatre sources de données à savoir ; Carte des sols (calcul de Y), Données de précipitations (calcul de H), model numérique de terrain (calcul de Ja) et des images satellitaires Landsat (calcul de, Xa et T).

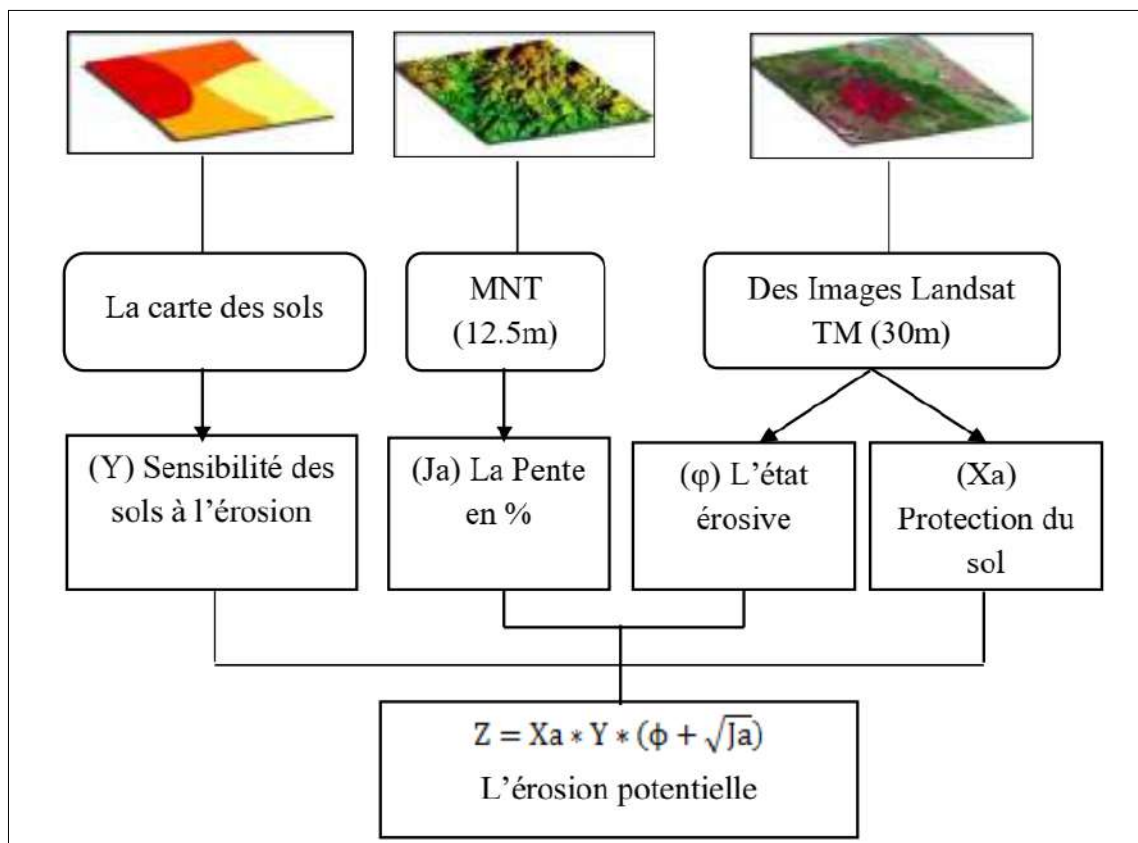


Figure 34 : Organigramme du modèle Gavrilovic (EPM).

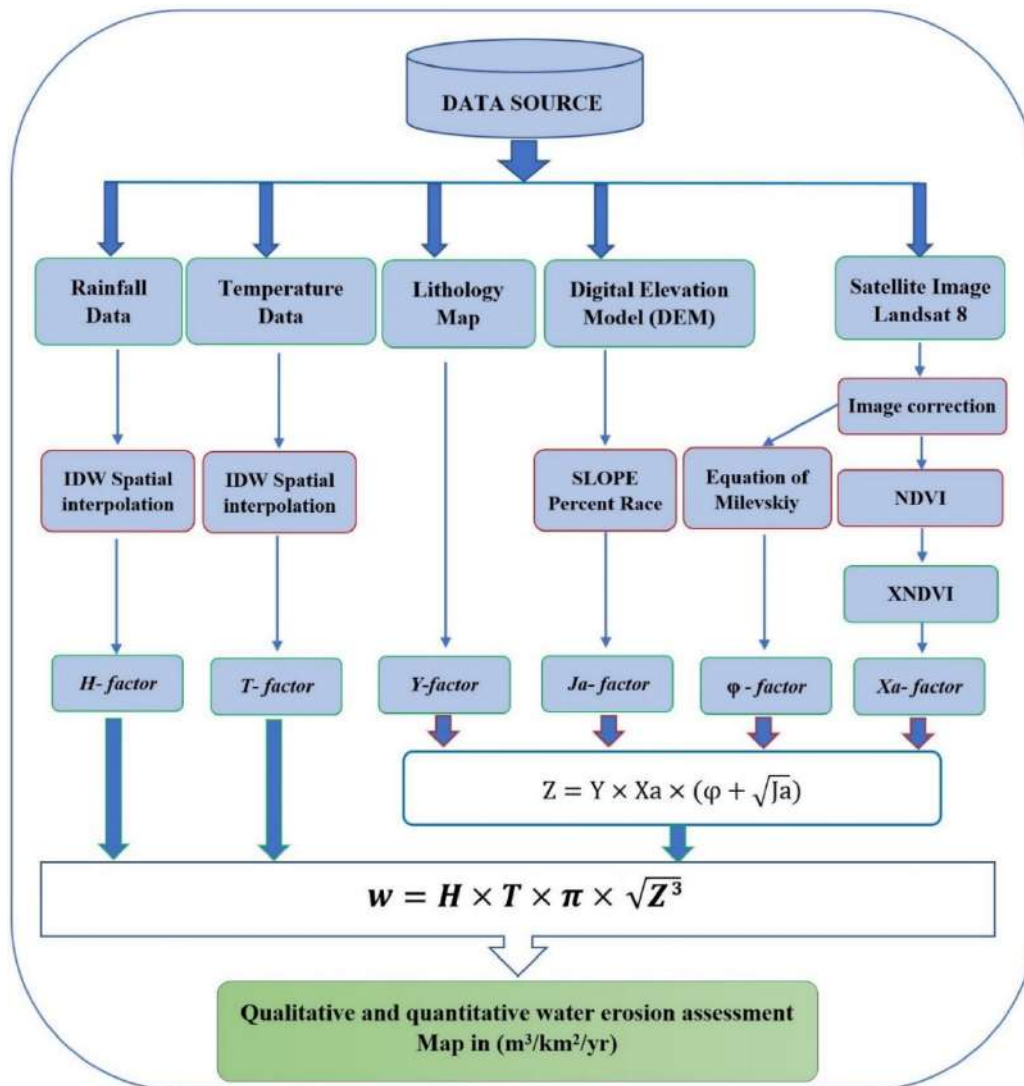


Figure 35 : Détails de la méthodologie EPM dans la zone d'étude (el brahimi et al , 2024)

Le coefficient Z est un paramètre d'érosion potentielle au niveau des bassins versants. C'est l'un des éléments les plus importants du modèle de Gavrilovic, qui implique un ensemble de variables, où à travers lui on peut suivre les changements des degrés d'érosion au fil du temps. Les niveaux d'érosion sont classés en fonction de la valeur Z (Gavrilovic Z. & al., 2006) en cinq catégories ([Tableau 15](#)).

Tableau 15 : Degrés d'érosion en fonction du coefficient Z (Gavrilovic Z. & al., 2006)

Degrés d'érosion potentielle	Z	Valeur moyenne
Très fort	1,01 – (>1,51)	1,25
Fort	0,81 – 1,0	0,85

Moyen	0,41 – 0,80	0,55
Faible	0,20 – 0,40	0,30
Très Faible	0,01 – 0,19	0,10

IV.4. Parametres utilises dans le modele d'érosion potentielle de gavrilocic (epm)

IV.4.1. Sensibilité de sol à l'érosion (Y)

Le facteur d'érosion (Y) d'un sol exprime sa sensibilité à l'érosion hydrique et dépend de ses propriétés intrinsèques à savoir sa texture, sa structure et sa perméabilité. Il se détermine pour un sol donné par l'équation de (Wishmeier et Smith, 1978) :

$$Y = (A/S)^{1/n}$$

Avec :

- **Y** : Coefficient d'érodabilité du sol,
- **A** : Perte annuelle moyenne de sol (tonne/acre/an)
- **S** : Longueur moyenne de la pente (pieds)
- **n** : Exposant de la pente (sans dimension).
-

$$Y = (0,00021 * (12 - MO) M^{1,14} + 3,25 (S-2) + 2,5 (p-3) / 100) * 1,58$$

Avec :

- **Y** : Coefficient de susceptibilité du sol à l'érosion, d'après Gavrilovic le sol est classé selon le facteur Y ([Tableau 16](#)).
- **MO** : Taux de la matière organique ;
- **M** : Texture : (% limons + % sables fins) * (100 - % argiles) ; S = Code de structure ([Tableau 17](#)).
- **P** : Coefficient de perméabilité ([Tableau 18](#)).

Tableau 16 : Type de sol en fonction de (Gavrilovic, 1962 ; 1970).

Type de sol	Facteur Y
Très bon résistance et cohésion	0.1 – 0.3
Moyen résistance et cohésion	0.3 – 0.5
Faible résistance	0.5 – 0.6
Débris d'agrégats et dépôts des sédiments grossiers	0.6 – 0.8
Sable fin, sol très faible résistance	> 0.9

Tableau 17 : Codification de la structure des sols (Wischmeier et Smith, 1978).

Nature de la structure	Code de la structure
Très structuré ou particulière	1
Assez structuré	2
Peu structuré	3
Non structuré	4

Tableau 18 : Codification de la perméabilité des sols (Wischmeier et Smith, 1978).

Degré de perméabilité	Code de perméabilité
Rapide	1
Modérée à rapide	2
Modérée	3
Modérée à lente	4
Lente	5
Très lente	6

Dans la zone d'étude, l'obtention d'une carte précise des sols n'est pas toujours possible en raison des contraintes de temps et de ressources. Par conséquent, d'autres sources d'information seront utilisées pour évaluer les caractéristiques des sols. Pour ce faire, nous nous appuierons sur les cartes géologiques de Bab Berret et du Rif, qui sont disponibles à des échelles de 1/25 000 et 1/500 000, respectivement. Bien que ces cartes ne fournissent pas d'informations détaillées sur les propriétés des sols, elles donnent des indications précieuses sur les caractéristiques géologiques et de relief de la région. En intégrant ces informations à d'autres sources de données, telles que les observations sur le terrain et la télédétection, nous pouvons mieux comprendre l'variabilité des sols et son impact sur divers processus environnementaux.

Les formations lithologiques dans le bassin de l'oued Amtar ont significativement affecté l'intensité de l'érosion. Les roches marneuses constituent les caractéristiques géologiques prédominantes et sont très sensibles aux processus érosifs. Plus de la moitié de la superficie totale du bassin est classée comme très sensible à l'érosion (avec un indice de 0,21 à 0,43) en raison de la présence de ces roches vulnérables. Par conséquent, l'érosion est une préoccupation majeure dans la zone d'étude, et la compréhension des facteurs sous-jacents qui y contribuent est cruciale pour une gestion efficace des ressources naturelles du bassin.

En identifiant et en analysant la distribution des zones sensibles à l'érosion, nous pouvons développer des stratégies ciblées pour atténuer l'érosion et son impact sur la qualité du sol, les ressources en eau et la biodiversité (*Figure 36*).

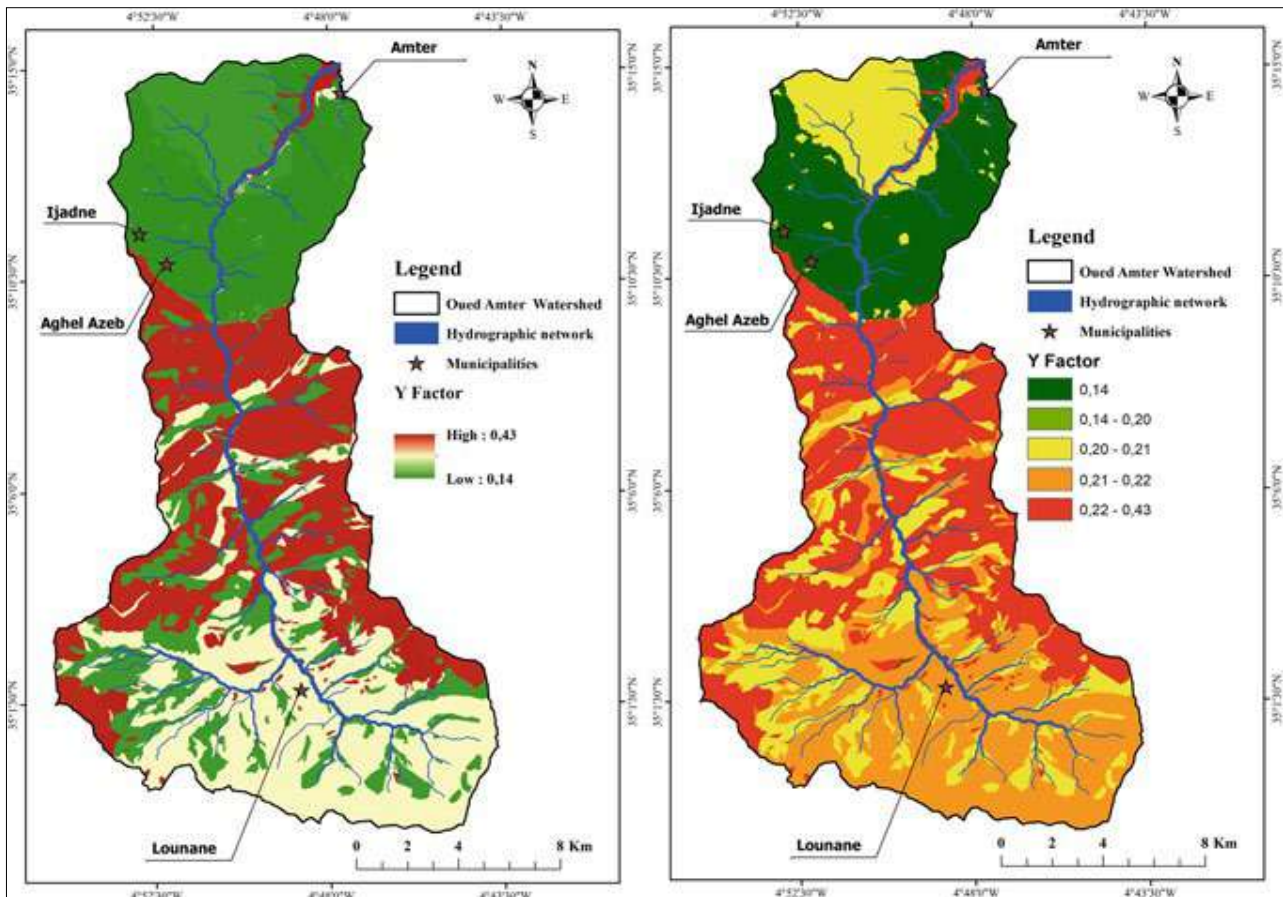


Figure 36 : Carte des coefficients de susceptibilité des sols à l'érosion (facteur Y), du bassin versant de l'oued Amtar

D'après la (*Figure 36*), les valeurs du coefficient d'érodibilité du sol (Y) dans le bassin versant de l'oued Amtar varient de 0,14 à 0,43. Cette plage de valeurs indique des degrés de résistance variables des roches et des sols à l'érosion hydrique dans cette zone. Les formations superficielles présentant une forte capacité d'érosion, avec des valeurs Y comprises entre 0,21 et 0,43, occupent plus de la moitié de la surface totale du bassin. Ces zones vulnérables se concentrent principalement dans la partie centrale du bassin, ainsi que dans quelques zones étroites au sud et au nord.

À l'inverse, les formations géologiques et pédologiques plus résistantes à l'érosion, avec des valeurs Y inférieures à 0,21, sont dispersées dans la partie nord du bassin et dans des zones étroites au sud et à l'aval. Cette variabilité spatiale de la sensibilité et de la résistance des formations superficielles contribue à des degrés divers d'érosion hydrique et de dégradation des sols dans le bassin versant de l'oued Amtar.

L'analyse approfondie de ces modèles de répartition de l'érodibilité, ainsi que la compréhension des facteurs géologiques, pédologiques et topographiques qui les sous-tendent, permettront de développer des stratégies de gestion ciblées pour atténuer les impacts de l'érosion sur la qualité des sols, les ressources en eau et la biodiversité de ce territoire.

IV.4.2. Les pentes de la zone d'étude en *Ja* (%)

Les pentes constituent un paramètre très important dans le modelé EPM. L'augmentation de la vitesse d'écoulement sous l'effet des pentes provoque fortement l'érosion. Les pentes sont calculées à partir du modèle numérique de terrain (MNT) d'une résolution de 30m.

Des valeurs *Ja* élevées indiquent des pentes raides et des pentes plus longues, qui sont plus sensibles à l'érosion, tandis que des valeurs *Ja* faibles indiquent un terrain plus plat et moins sensible à l'érosion. Le paramètre *Ja* est utilisé en conjonction avec d'autres paramètres EPM, tels que le coefficient d'érodibilité du sol (*Y*) et le facteur d'érosivité des précipitations (*C*), pour estimer la quantité de perte de sol et de sédiments dans une zone donnée. En évaluant la valeur *Ja* dans une zone d'étude, nous pouvons identifier les zones qui sont particulièrement vulnérables à l'érosion.

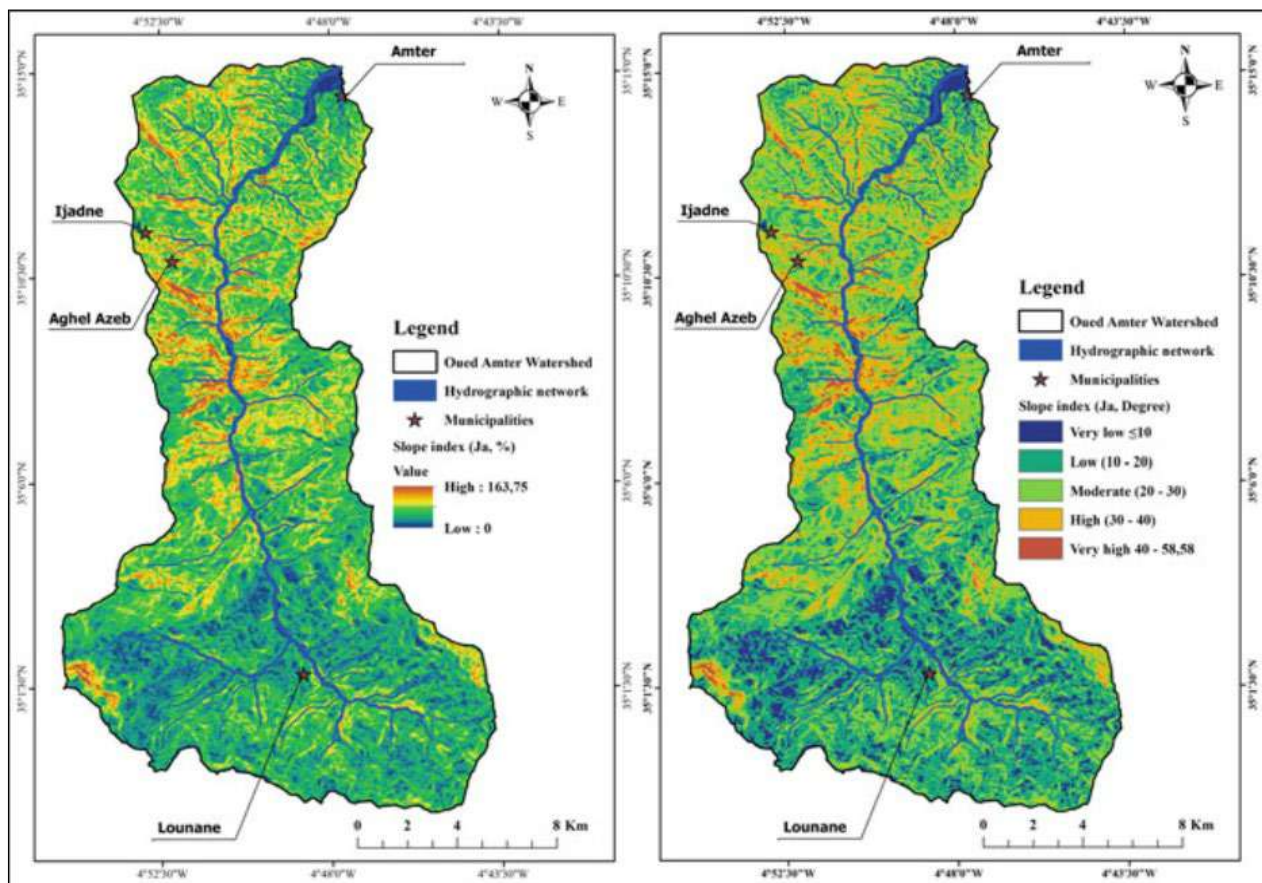


Figure 37 : Carte des pentes JA (%) du bassin versant de l'oued Amtar

Le bassin versant de l'oued Amtar est caractérisé par une forte présence de pentes raides à très raides (*Figure 37*). Cette configuration du terrain favorise le ruissellement, entraîne un déplacement rapide de l'eau des précipitations et augmente la quantité d'eau qui s'écoule en aval. Ainsi, ces pentes fournissent une forte puissance érosive de l'eau et favorisent un taux accru de matériaux érodés de l'amont vers l'aval dans le bassin. Modèle numérique d'élévation (MNE) d'une résolution de 30 mètres. La figure 8 illustre la gamme des valeurs de pente dans la zone d'étude, qui varient de 0 à 163,75 %.

Le MNE a fourni des informations précieuses sur la longueur et l'inclinaison des pentes et sur les caractéristiques topographiques qui influencent le ruissellement de l'eau et l'érosion du sol. Des valeurs élevées de Ja indiquent des pentes plus raides et plus longues qui sont plus sujettes à l'érosion, tandis que des valeurs plus faibles suggèrent un terrain plus plat qui est moins sensible à l'érosion. En analysant les valeurs de Ja dans la zone d'étude, nous pouvons identifier les endroits particulièrement vulnérables à l'érosion induite par l'eau et donner la priorité aux mesures de gestion visant à atténuer la perte de sol et la production de sédiments.

IV.4.3. Coefficient de protection des sols (Xa)

Le coefficient de protection du sol (Xa) est un paramètre clé de l'EPM pour évaluer le potentiel d'érosion du sol dans une zone donnée ([Solaimani et al. 2009](#) ; [Elaloui et al. 2022](#)). Plusieurs paramètres

Évaluation des risques d'érosion de surface et profonde à oued Amtar (Rif, Maroc)

Apport des outils géomatiques et de machine Learning

sont pris en considération comme le taux de recouvrement végétal, le stade de développement, le type de la végétation, le coefficient d'abondance et les moyens de protection du sol et les pratiques agricoles maintenus dans le bassin versant de l'oued Amtar.

Des valeurs X_a élevées indiquent que le sol est bien protégé, tandis que des valeurs X_a faibles suggèrent que le sol est plus vulnérable à l'érosion (Rahman et al. 2015 ; Barakat et al. 2023). Le paramètre X_a est combiné à d'autres paramètres EPM, tels que le coefficient d'érodibilité du sol (Y) et le facteur d'érosivité des précipitations C , pour estimer la quantité de perte de sol et de sédiments dans une zone donnée (**Figure 38**). En analysant la valeur X_a dans une zone d'étude, nous pouvons identifier les zones qui nécessitent des mesures d'urgence antiérosifs pour améliorer la protection des sols et réduire l'impact de l'érosion induite par l'eau sur la qualité des sols et les ressources naturelles (Hosseini et Ashraf, 2015 ; Chalise et al. 2019).

Dans la zone d'étude, le degré de protection des sols (X_a) varie en fonction de l'indice de couverture végétale, les valeurs de X_a vont de 0,11 dans les zones à couverture végétale importante (par exemple, forêts matures, végétation épaisse) à 0,85 dans les zones à faible protection en raison de l'absence de couverture végétale (par exemple, terres cultivées matures saisonnières et dégradées). Ces zones étaient dispersées dans le bassin en zones étroites. En analysant les valeurs X_a dans la zone d'étude, nous pouvons identifier les zones qui nécessitent des mesures antiérosives pour améliorer la protection des sols, telles que la mise en œuvre de la restauration de la végétation ou des pratiques de gestion des sols, afin de réduire l'impact de l'érosion induite par l'eau sur la qualité des sols et les ressources en eau (**Figure 38**).

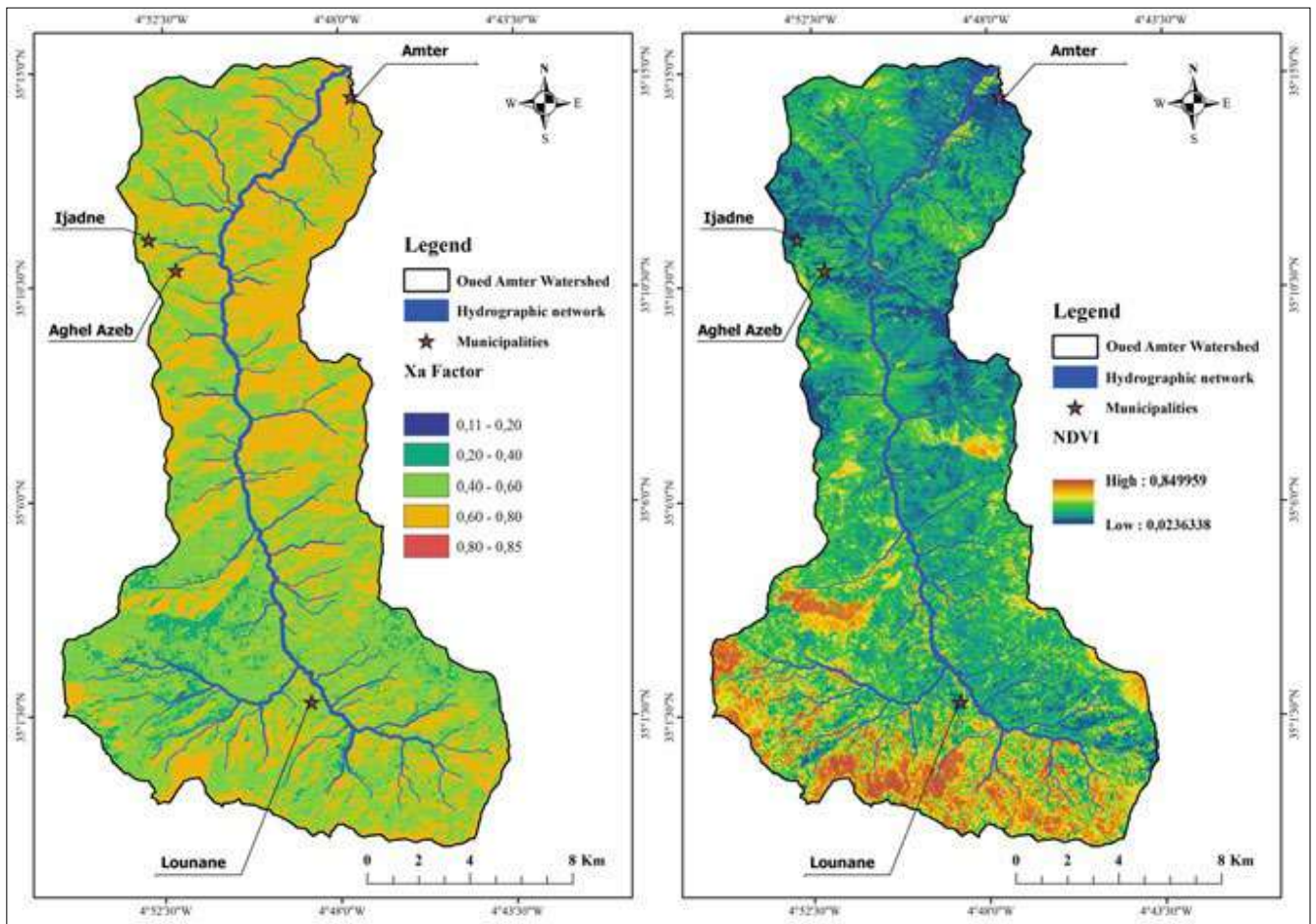


Figure 38 : Carte de protection des sols (Xa) basée sur le modèle EPM dans le bassin versant de l'oued Amtar

IV.4.4. Coefficient du taux d'érosion (Φ)

Le coefficient de taux d'érosion (ϕ) est un paramètre important utilisé dans le modèle EPM pour estimer la quantité de perte de sol due à l'érosion induite par l'eau dans une zone donnée (Dragičević et al. 2018 ; Zhou et al. 2023). La valeur ϕ représente le taux d'érosion du sol causé par l'eau et est influencée par divers facteurs tels que la topographie, la couverture végétale et l'érodabilité du sol. Des valeurs ϕ élevées indiquent des taux de perte de sol plus élevés, tandis que des valeurs ϕ faibles indiquent des taux de perte de sol plus faibles (Istanbulluoglu et Bras, 2005 ; Maliqi et Singh 2019). La valeur ϕ est combinée à d'autres paramètres, tels que le coefficient d'érodabilité du sol (Y) et le facteur d'érodabilité des précipitations ©, pour estimer la quantité de perte de sol et le rendement en sédiments dans un bassin versant. En évaluant la valeur ϕ dans le bassin versant de l'oued Amtar, nous pouvons identifier des zones particulièrement vulnérables au risque d'érosion hydrique.

La télédétection spatiale et les systèmes d'information géographique (SIG) fournissent des outils précieux pour calculer les indicateurs d'érosion à partir des images Landsat en utilisant la racine carrée de la troisième bande (TM3) divisée par la valeur maximale du rayonnement (Qmax) pour générer des indices d'érosion (Fig. 10). En termes plus simples, cette approche permet d'identifier les zones

présentant des taux d'érosion élevés en produisant des indices d'érosion élevés et vice versa (Mesrar et al. 2015). Pour l'image Landsat 8, le type et l'étendue du coefficient d'érosion ϕ peuvent être déterminés avec précision à l'aide de la formule suivante :

$$\phi = \sqrt{\frac{R}{Q_{max}}}$$

Avec :

- **R** : bande 4 de l'image Landsat 8,
- **Q** : maximum de radiance de la bande 4.

Plusieurs facteurs, tels que la couverture végétale, les formations géologiques, la topographie, le climat et les pratiques d'utilisation des terres, influencent l'état d'érosion d'une zone donnée. Dans le bassin versant de l'oued Amtar, l'intensité de l'érosion varie en fonction de la distribution de ces différents paramètres, ce qui se traduit par une gamme de valeurs d'état érosif allant de faible 0,31 à élevé 0,61 (*Figure 39*). Il est important de noter que plus de la moitié du bassin versant est classée comme ayant un état érosif très élevé, avec des valeurs comprises entre 0,40 et 0,61. Ces résultats soulignent la nécessité urgente de mettre en place des stratégies de gestion efficaces de l'érosion afin d'atténuer les impacts environnementaux et socio-économiques dans cette région.

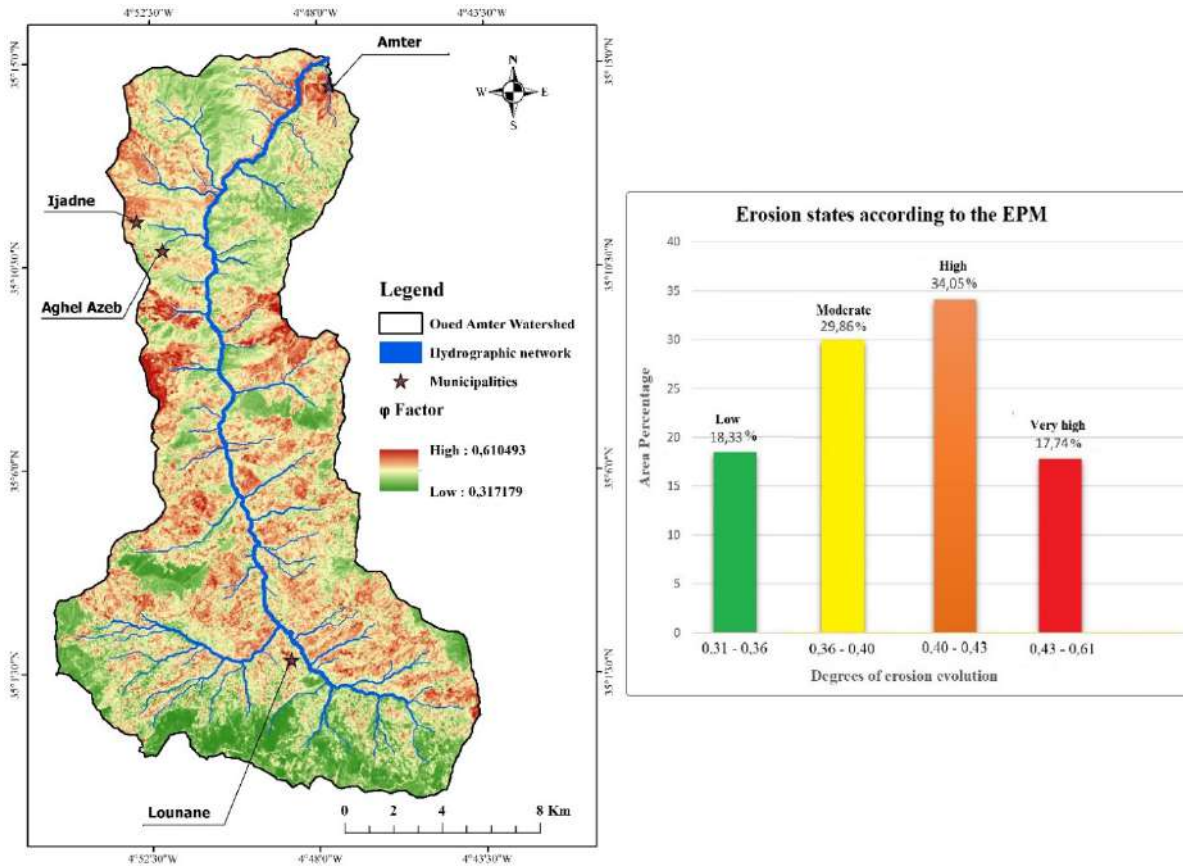


Figure 39 : Cartographie des coefficients du taux d'érosion (ϕ), dans le bassin versant de l'oued Amtar

IV.4.5. Coefficient d'érosion (Z)

Un élément clé du modèle EPM (Erosion Potential Model) est l'indice de potentiel d'érosion (Z), qui permet d'estimer le risque d'érosion relatif dans différentes zones d'un bassin versant (Maliqi et Singh 2019 ; Kabo-Bah et al. 2021). Cet indice est calculé en combinant plusieurs facteurs contribuant à l'érosion des sols, notamment : (i) la texture du sol, qui influence son érodibilité (facteur d'érodibilité des sols, Y). (ii) l'angle de la pente, qui détermine la susceptibilité du terrain à l'érosion (pente moyenne en pourcentage, Ja), (iii) L'intensité des précipitations, qui joue un rôle majeur dans les processus érosifs (coefficient des processus d'érosion, ϕ), et (iv) la couverture végétale et les pratiques de gestion des terres, qui protègent les sols contre l'érosion (coefficient de protection des sols, Xa).

Chacun de ces facteurs s'est vu attribuer un coefficient de pondération en fonction de son importance relative dans la contribution à l'érosion. Leur combinaison au sein d'un système d'information géographique (SIG) a permis de dériver une valeur d'indice de potentiel d'érosion (Z) pour chaque emplacement dans la zone d'étude (Ouyang et al. 2018 ; Benzougagh et al. 2023). Cet indice composite offre une évaluation globale du risque d'érosion, en intégrant à la fois les propriétés du sol, les caractéristiques du terrain et les processus érosifs observés dans le bassin versant. Il constitue

ainsi un outil précieux pour identifier les zones les plus vulnérables et orienter la mise en place de stratégies de gestion durable des terres.

Le coefficient d'érosion (Z) est calculé selon l'équation ci-dessous, il est sans dimension et indique la sévérité ou l'intensité d'érosion dans un bassin versant. Sa valeur (Z) définit les classes d'érosion selon le tableau de Gavrilovic (*Tableau 19*).

$$Z = X_a * Y * (\varphi + \sqrt{J_a})$$

Avec :

- **X_a** : Coefficient de protection du sol du bassin versant, se rapportant à la protection des sols par la couverture végétale, des influences des phénomènes atmosphériques des forces érosives liées aux conditions naturelles.
- **Y** : Coefficient d'érodibilité du sol, indique la sensibilité des sols à l'érosion dépend de la géologie du bassin versant.
- **φ** : Coefficient de type et d'étendue de l'érosion équivalant numérique des processus visibles et nettement prononcés dans le bassin versant.
- **J_a** : Pente moyenne de la zone d'étude en (%).

Tableau 19 : La classe de l'érosion en fonction de (Z) (Gavrilovic, 2006).

Valeur de (Z)	Classes d'érosion	Superficie (Km ²)	Superficie (%)
1,01–3,129	Érosion très élevée	58,1193	20.21
0,71–1	Érosion élevée	109,808	38.18
0,41–0,70	Érosion moyenne	106,726	37.11
0,20–0,40	Érosion faible	11,8233	4.11
0,01–0,19	Érosion très faible	1,0629	0.36

Les résultats de la classification présentés dans le (*Tableau 19*).montrent que près de 60 % de la superficie du bassin versant de l'oued Amtar présente un risque d'érosion élevé à très élevé, avec un indice de potentiel d'érosion (Z) supérieur à 0,71. À l'inverse, seule une faible fraction du bassin 4,47 % affiche une intensité d'érosion faible à très faible dont Z compris entre 0,01 et 0,4. La majeure partie du bassin versant de l'oued Amtar 37,11 % se situe dans la catégorie d'intensité d'érosion modérée, soit un risque modéré. L'analyse révèle ainsi que plus de la moitié du bassin versant présente un potentiel d'érosion fort à très fort, avec une valeur de Z supérieure à 0,71. Ces zones à haut risque se caractérisent par des pentes raides à très raides, ainsi que des pentes modérées associées à une couverture végétale réduite. Elles se répartissent sous forme de bandes étroites à travers le bassin, englobant diverses parties de celui-ci (*Figure 40*).

Ces résultats soulignent l'importance d'une gestion ciblée des zones les plus vulnérables à l'érosion, afin de préserver les ressources en sols et prévenir les dommages potentiels. Des mesures de

protection et de restauration des terres devraient être envisagées de manière prioritaire dans ces secteurs identifiés à haut risque.

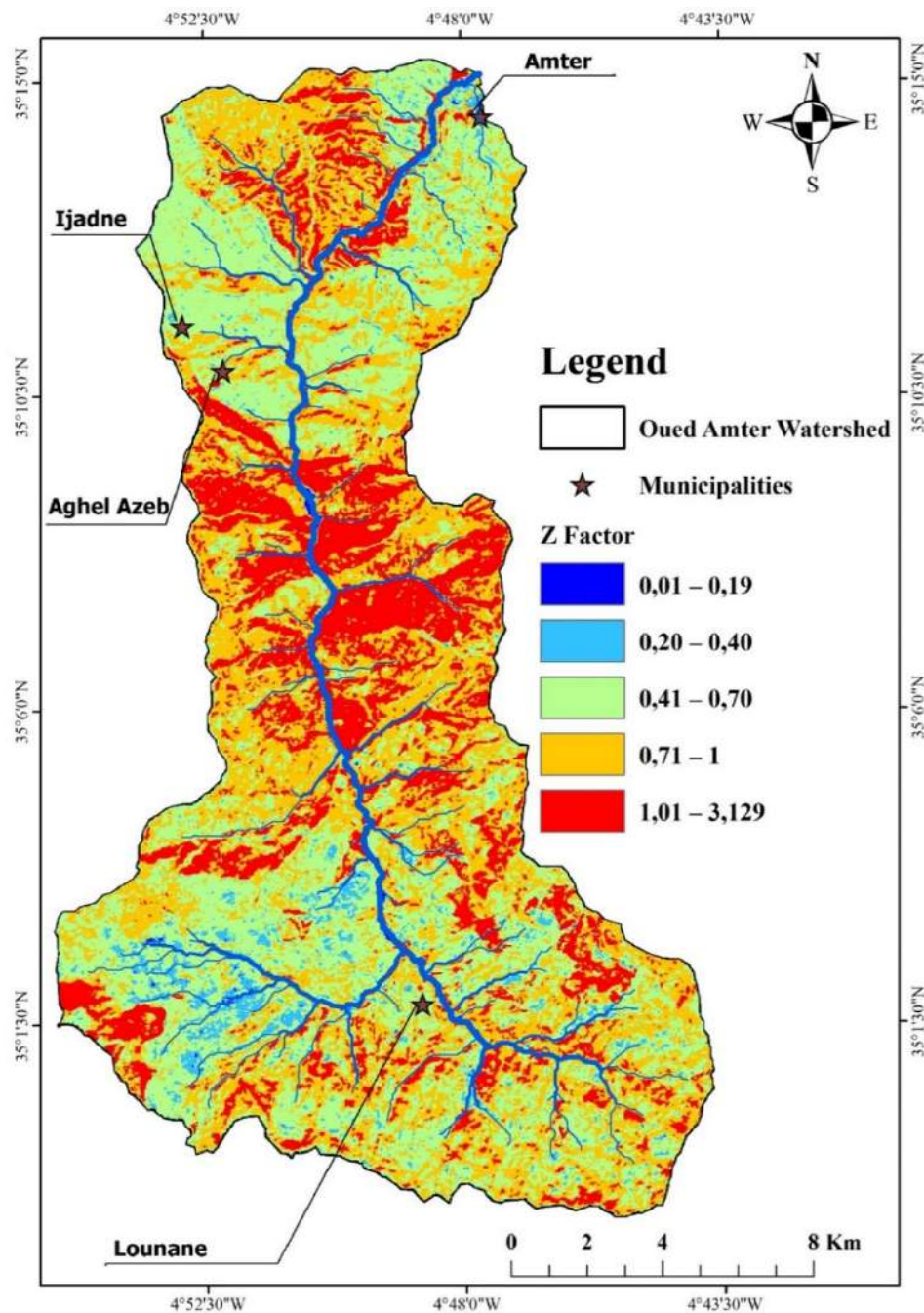


Figure 40 : Carte du coefficient d'érosion Z dans le bassin versant de l'oued Amtar

IV.5. Evaluation quantitative de l'érosion hydrique par le modèle de Gavrilovic (EPM).

La mesure directe des processus érosifs nécessite des moyens techniques et humains importants, ainsi qu'un suivi sur le long terme, ce qui peut s'avérer très coûteux. C'est pourquoi les chercheurs ont développé des approches mathématiques permettant d'estimer les taux d'érosion à l'échelle du bassin versant, à partir de paramètres clés. Ce qui distingue particulièrement la méthode de Gavrilovic (EPM), c'est sa capacité à prendre en compte différents types d'érosion, depuis l'érosion en nappe jusqu'aux

Évaluation des risques d'érosion de surface et profonde à oued Amtar (Rif, Maroc)

Apport des outils géomatiques et de machine Learning

mouvements de terrain. Cette approche holistique permet d'avoir une vision d'ensemble des processus érosifs à l'œuvre dans un système donné.

En effet, cette méthode a été largement appliquée et validée dans diverses régions du monde, notamment en Europe de l'Est, en ©, en Suisse, en Iran et même au Maroc dans le bassin de l'Amzaz, et Beht. Les études menées ont généralement conclu que le modèle EPM offrait une estimation plus fidèle de la réalité par rapport à d'autres modèles mathématiques.

Cependant, force est de constater que l'utilisation de cette méthode reste encore peu répandue dans le monde arabe. C'est un constat intéressant qui mériterait d'être approfondi, afin de comprendre les éventuelles barrières à son adoption dans ces régions. Une meilleure appropriation de cet outil par la communauté scientifique locale pourrait contribuer à une gestion plus durable des ressources en sols. Ce modèle est appliqué selon une série d'équations comme suit :

$$W = T * H * \pi * \sqrt{Z^3}$$

Avec :

- **W** : taux annuel d'érosion (m3/km2/an) ;
- **Z** : facteur d'érosion potentiel.,
- **H** : Taux de précipitations annuel (mm) ;
- **T** : coefficient de température.

IV.5.1. Coefficient de la température (T)

La température est un facteur d'érosion très important dans ce modèle de Gavrilovic, car elle a un effet évident sur l'eau dans le sol. La température maximale permet d'augmenter l'évaporation et la transpiration et conduit à l'apparition des fissures (des fentes de dessiccation) qui permettent de démanteler les formations argileuses en particulier, et les variations thermiques successives permettent le démantèlement des composants des roches et des formations superficielles ([Ghobadi et al. 2011](#) ; [Lense et al. 2023](#)).

Gavrilovic a cherché à adopter la température comme facteur d'érosion dans le modèle EPM. Les valeurs du coefficient de température sont déterminées par une formule spéciale qui prend la température moyenne annuelle comme variable de base pour calculer le coefficient.

$$T = \left(\sqrt{\frac{t_o}{10}} + 0.1 \right)$$

Avec :

- **t₀** : Température moyenne annuelle en (C°).

Nous préférons d'utiliser la température obtenue à partir d'images satellitaires plutôt que la température estimée à partir des interpolations des données de certaines stations pluviométrique pour l'étude de l'érosion. Effectivement, devant l'absence des données de la température dans le bassin versant, les images satellites indiquent une valeur assez réelle de la température locale, notamment la température de la surface.

Cependant, les stations climatiques basées sur des modèles d'interpolation de la température moyenne à l'ombre et des valeurs locales sont des valeurs estimées, à l'exception des valeurs proches de la station climatique. En outre, la majorité des bassins ne possèdent pas de thermomètres ou ont cessé de fonctionner, et le coût d'obtention de ces mesures sur le terrain est élevé, ce qui rend les données d'imagerie satellitaire une solution fiable. Nous avons utilisé une série d'images satellites Landsat 8 pour créer la carte des moyennes thermiques du bassin versant de l'oued Amtar (*Figure 41*).

Des valeurs élevées du coefficient (T) indiquent un potentiel plus élevé d'érosion du sol en raison de l'effet de la chaleur sur l'humidité et la structure du sol. L'humidité du sol diminue avec l'augmentation de la température, ce qui entraîne une augmentation du détachement des particules du sol et de l'érosion. En outre, des températures plus élevées peuvent entraîner des changements dans la structure du sol et réduire la stabilité du sol, le rendant plus sensible à l'érosion ([Dang et al. 2015](#) ; [Zeghmar et al. 2022](#)).

Toute la rive droite de l'oued Amtar, présente des coefficients élevés ce qui s'explique par la dominance des hautes altitudes et l'effet d'exposition. Les seuls endroits qui ont un coefficient faible sont localisés au niveau la rive gauche, ainsi que la partie sud du bassin versant. On peut conclure que les valeurs de la température baissent progressivement de l'amont vers l'aval du bassin.

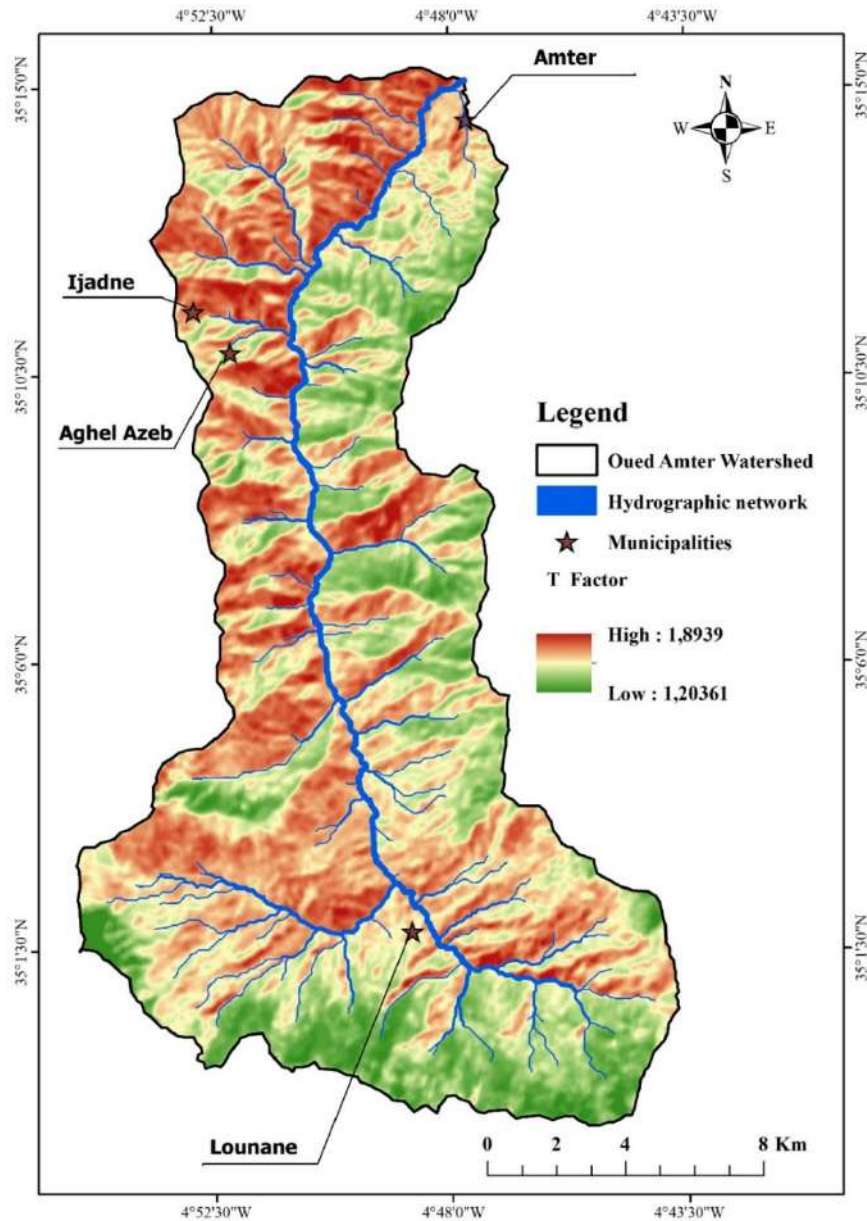


Figure 41 : Carte du coefficient de la température de surface dans le bassin versant de l'oued Amtar

IV.5.2. Coefficient de Précipitation moyenne annuelle en (H)

La précipitation joue le premier rôle dans l'excitation de l'érosion hydrique, en commençant par les gouttes de pluie qui ont frappé la surface et l'écoulement superficiel (Splash) et en fin le drainage principal dans les cours d'eau principales (Wang et al. 2017 ; Marko et al. 2023). En plus, les averses orageuses soudains qui érode des grandes quantités de sol, en particulier les zones ont une pente raide, absence du couvert végétal et l'exploitation excessive des sols. Pour estimer le coefficient des précipitations annuelles (H), nous avons utilisé les données des stations pluviométriques du bassin versant de l'oued Amtar.

Dans la zone d'étude, la mesure de la quantité annuelle totale et la répartition spatio-temporelle de pluie érosive aux stations, montre que le bassin versant de l'oued Amtar est soumis à une précipitation

interannuelle importante (*Figure 42*). Les valeurs de (H) subissent un gradient croissant de l'amont du bassin versant vers l'aval. Avec une variation entre 1637 mm à 1937 mm. Ce résultat permet de déduire que le bassin est sujet à un pouvoir érosif important.

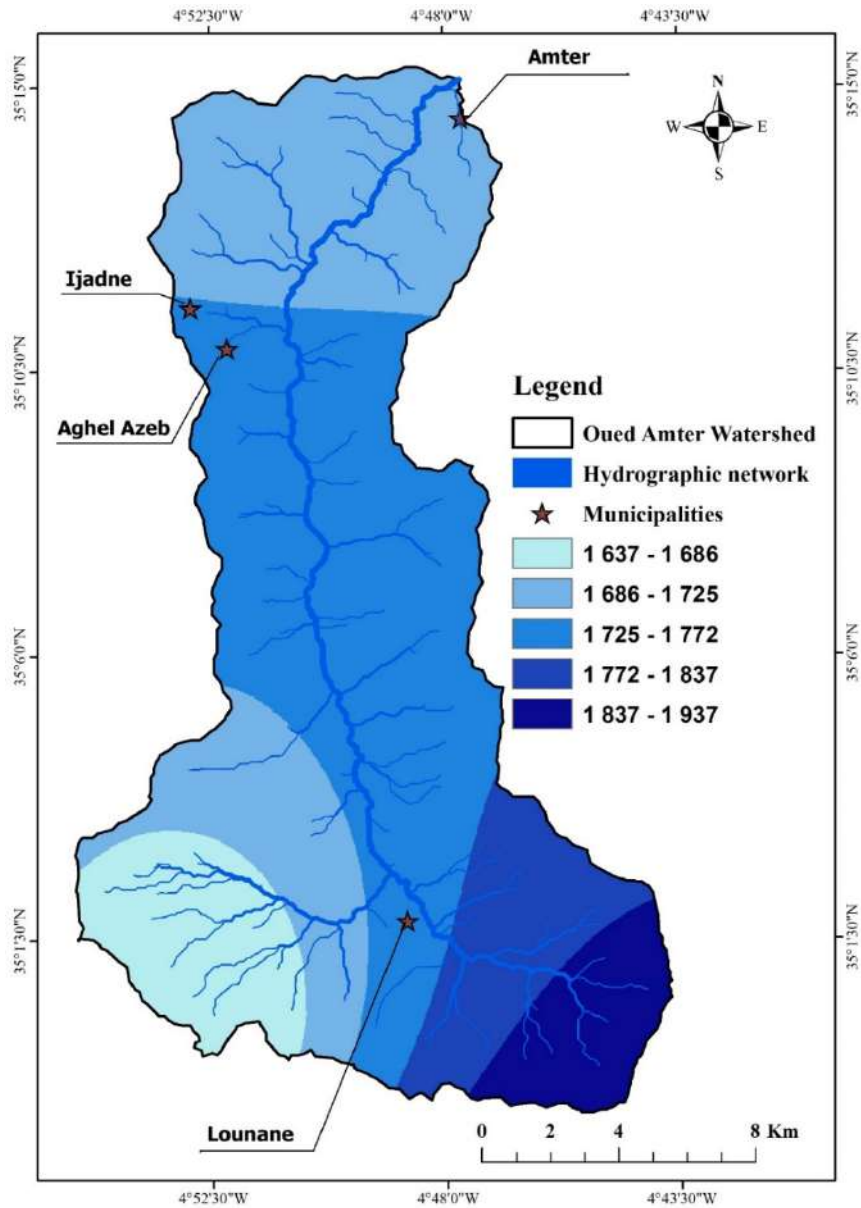


Figure 42 : Carte du coefficient des précipitations moyennes annuelles (H) du bassin versant de l'oued Amtar

IV.5.3. Volume annuel moyen d'érosion estimé (W)

Après l'élaboration de toutes les cartes représentant les différents facteurs du modèle EPM nous obtenons la carte de volume annuel moyen (W), selon l'équation citée ci-dessus. Le volume annuel moyen des sédiments érodés est exprimé en $m^3/km^2/an$, mais dans le but d'estimer les quantités (masses) totales des sédiments érodés en $Tonne/Km^2/an$, nous utilisons l'équation suivante :

$$G = W * M$$

Avec

- **G** : quantités annuelles moyenne d'érosion (Tonne/ha/an).
- **W** : volume annuel moyen des sédiments érodés ($\text{m}^3/\text{km}^2/\text{an}$).
- **M** : masse volumique (Tonne/ m^3).

D'après les résultats de l'application du modèle Gavrilovic, Milivsky et al. 2008 ont observé que les taux d'érosion annuels faibles sont inférieurs à $500 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{an}$ et que les taux d'érosion élevés sont supérieurs à $800 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{an}$. Selon les travaux de Zachar. (1982), six catégories d'érosion hydrique ont été déterminées en fonction de la perte de sol (**Tableau 20**).

Tableau 20 : Degré d'érosion en fonction de la perte en sol ($\text{m}^3/\text{km}^2/\text{an}$)

Classes	Degré d'érosion	Volume du sol perdu ($\text{m}^3/\text{km}^2/\text{an}$)
1	Absence d'érosion/ érosion	< 50
2	Erosion Faible	50 – 500
3	Erosion moyenne	500 – 1500
4	Erosion généralisée	1500 – 5000
5	Erosion forte	5000 – 20000
6	Erosion extrême	>20000

L'application de la formule pour calculer le taux d'érosion dans notre bassin a montré des valeurs qui varient entre la classe de degré d'érosion faible [$55,91\text{--}500$] $\text{m}^3/\text{km}^2/\text{an}$ et la classe d'érosion catastrophique [$20,000\text{--}44\,088,33$] $\text{m}^3/\text{km}^2/\text{an}$. La moyenne annuelle de l'érosion dans le bassin versant de l'oued Amtar est estimée à environ $1600 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{an}$. Selon les classifications identifiées par Zachar D. (1982) et Milevsky I. & al., (2008), cette valeur exprime un niveau d'érosion élevé à très élevé et généralisé. Les classes les plus représentées dans le bassin versant sont celles de l'érosion élevé à très élevé généralisé avec environ 90% de la totalité du bassin, dont le volume du sol perdu varie de $5000 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{an}$ à $20000 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{an}$. Les zones les plus sensibles à l'érosion hydrique est généralisés dans la totalité du bassin versant de l'oued Amtar, mais la partie médiane du bassin est la plus touché (**Tableau 21 & Figure 43**).

Tableau 21 : Classement d'érosion dans le bassin versant de l'oued Amtar.

Classes	Volume du sol perdu ($\text{m}^3/\text{Km}^2/\text{an}$)	Degré d'érosion	Superficie (Km^2)	Sup %
1	55,91–500	Faible	0,837515	0,29
2	500 – 1500	Moyen	3,28842	1,14
3	1500 – 5000	Elevé	115,739	40,26
4	5000 – 20000	Très élevé	166,327	57,86
5	20000 – 44 088,33	Catastrophique	1,25017	0,43

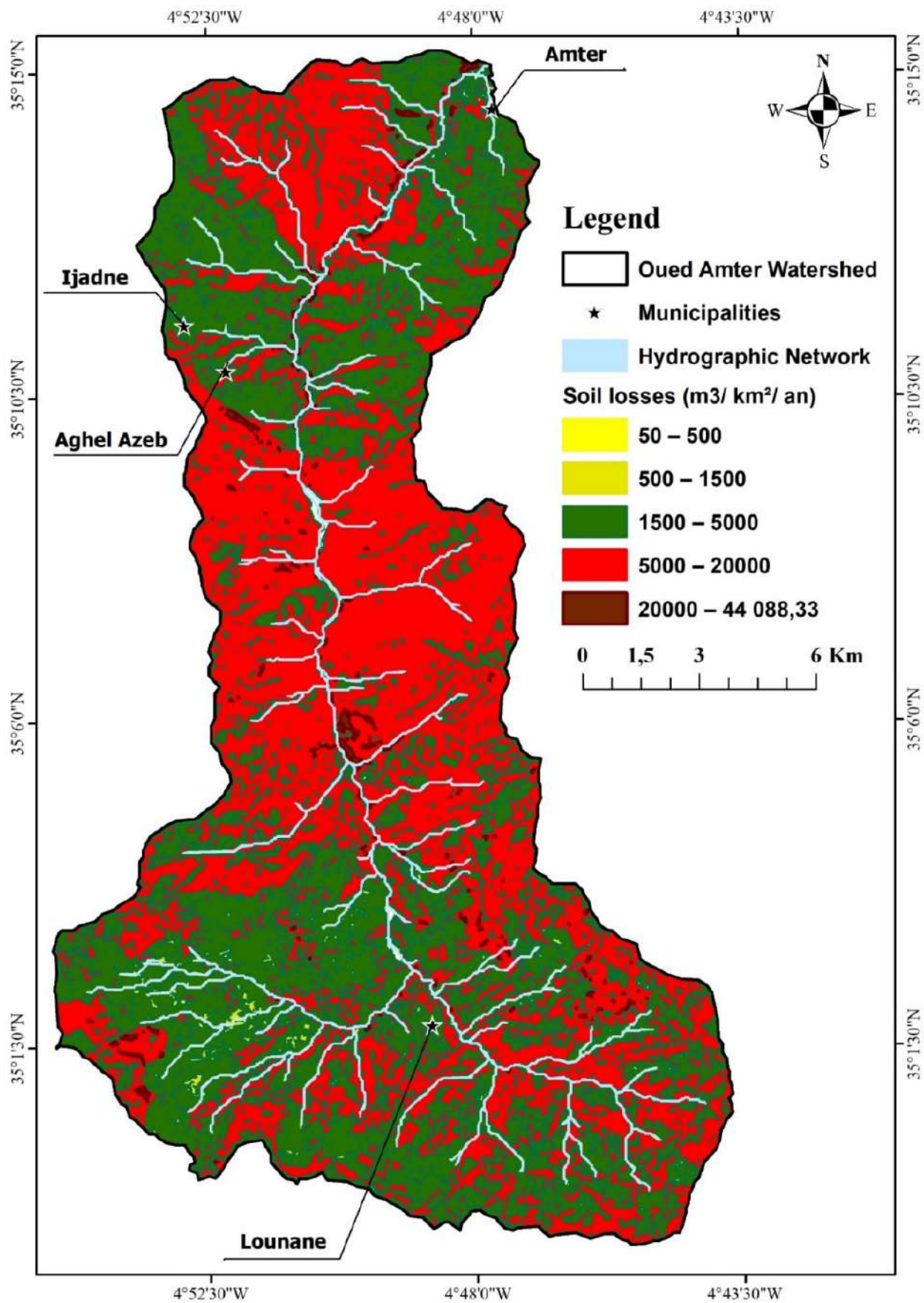


Figure 43 : Carte des pertes de sol dans le bassin versant de l'oued Amtar

IV.6. Conclusion

L'analyse des résultats du modèle EPM de Gavrilovic à l'aide d'un système d'information géographique (SIG) a permis de déterminer les facteurs causaux décisifs qui contrôlent l'érosion hydrique qui sont par ordre d'importance la sensibilité des sols à l'érosion, les pentes, la densité du couvert végétal, la protection des sols, les précipitations, les types d'érosion, et la température.

Les résultats montrent que, la majorité du bassin versant de l'oued Amtar (57,86%) est soumise à une érosion très élevée, avec des pertes de sol comprises entre 5 000 et 20 000 m³/km²/an. Une part importante (40,26%) est également classée en érosion élevée, avec des pertes de sol entre 1 500 et 5 000 m³/km²/an. Les zones en érosion moyenne (500 à 1 500 m³/km²/an) ne représentent que 1,14% de la superficie totale, tandis que les zones en érosion faible (55,91 à 500 m³/km²/an) n'occupent que 0,29% du bassin. Enfin, une petite fraction (0,43%) est classée en érosion catastrophique, avec des pertes de sol dépassant 20 000 m³/km²/an.

Cette analyse détaillée de l'érosion des sols dans la zone d'étude fournit des informations essentielles pour une gestion durable des ressources en sols. En identifiant clairement les secteurs les plus sujets à une érosion élevée ou très élevée, elle permet de cibler en priorité les zones nécessitant des mesures de lutte contre l'érosion. Cela peut inclure la mise en place de techniques de conservation des sols, de dispositifs antiérosifs, ou encore de pratiques agricoles plus respectueuses de l'environnement.

Grâce à cette cartographie de l'érosion réalisée à l'aide du modèle EPM, les gestionnaires disposent désormais d'un outil précieux pour planifier et prioriser les actions à mener. Cela contribuera à préserver sur le long terme la fertilité des sols et les écosystèmes du bassin versant, en limitant les phénomènes d'érosion hydrique qui constituent une menace majeure. Cette étude illustre tout l'intérêt de coupler l'expertise terrain et les technologies de télédétection et de SIG pour une gestion durable des ressources naturelles.

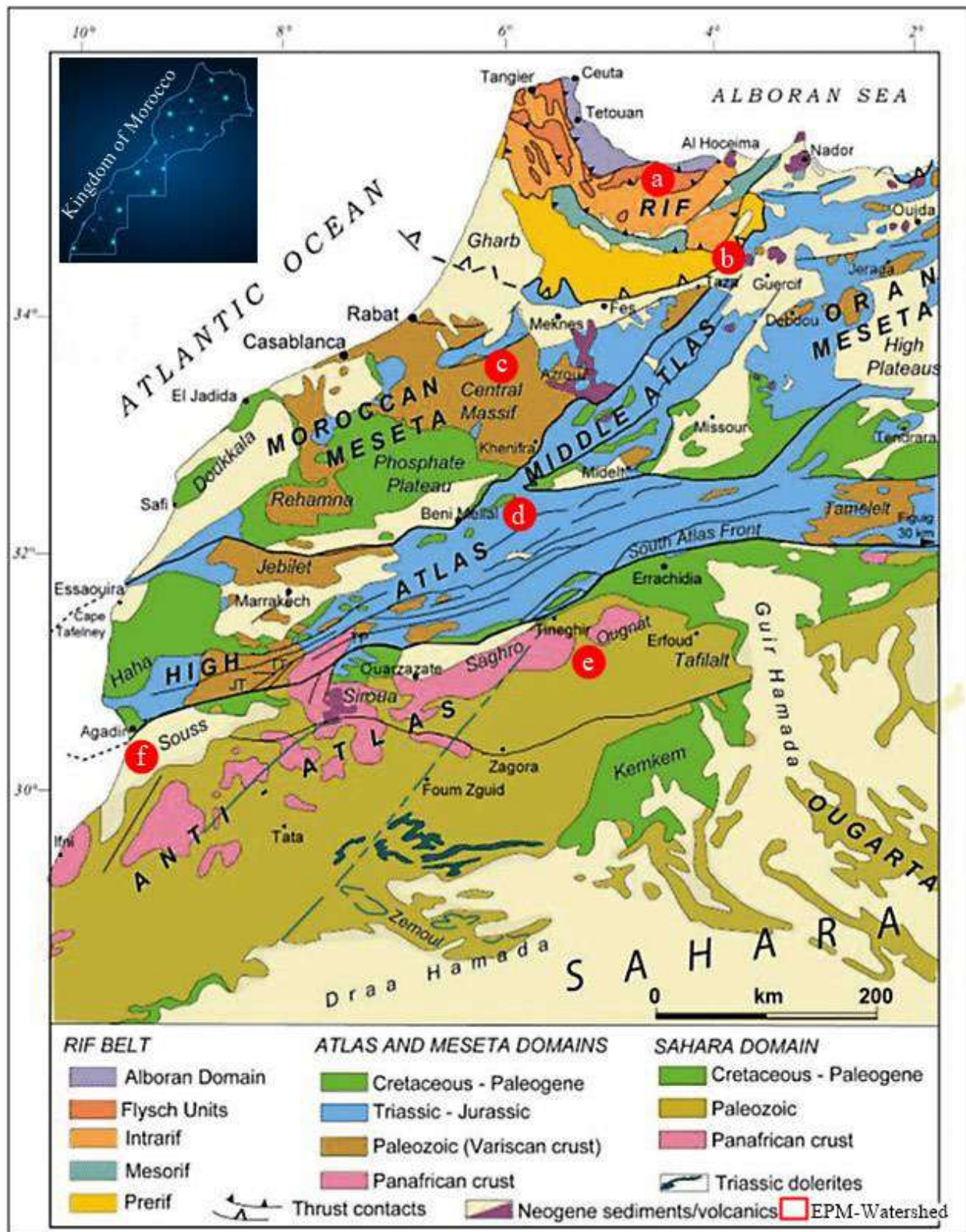


Figure 44 : Carte des cas d'évaluation du taux d'érosion du sol à l'aide du modèle EPM au Maroc : (a) : Bassin versant de l'Amter, (b) : Bassin versant de l'Inaouene, (c) : Bassin versant de Beht, (d) : Bassin versant de Ouaoumana, (e) : Bassin versant de Toudgha, (f) : bassin du Souss.

Conclusion du chapitre IV

L'analyse des résultats du modèle EPM de Gavrilovic à l'aide d'un système d'information géographique (SIG) a permis de déterminer les facteurs causaux décisifs qui contrôlent l'érosion hydrique qui sont par ordre d'importance la sensibilité des sols à l'érosion, les pentes, la densité du couvert végétal, la protection des sols, les précipitations, les types d'érosion, et la température.

Les résultats montrent que, la majorité du bassin versant de l'oued Amtar (57,86%) est soumise à une érosion très élevée, avec des pertes de sol comprises entre 5 000 et 20 000 m³/km²/an. Une part importante (40,26%) est également classée en érosion élevée, avec des pertes de sol entre 1 500 et 5 000 m³/km²/an. Les zones en érosion moyenne (500 à 1 500 m³/km²/an) ne représentent que 1,14% de la superficie totale, tandis que les zones en érosion faible (55,91 à 500 m³/km²/an) n'occupent que 0,29% du bassin. Enfin, une petite fraction (0,43%) est classée en érosion catastrophique, avec des pertes de sol dépassant 20 000 m³/km²/an.

Cette analyse détaillée de l'érosion des sols dans la zone d'étude fournit des informations essentielles pour une gestion durable des ressources en sols. En identifiant clairement les secteurs les plus sujets à une érosion élevée ou très élevée, elle permet de cibler en priorité les zones nécessitant des mesures de lutte contre l'érosion. Cela peut inclure la mise en place de techniques de conservation des sols, de dispositifs antiérosifs, ou encore de pratiques agricoles plus respectueuses de l'environnement.

Grâce à cette cartographie de l'érosion réalisée à l'aide du modèle EPM, les gestionnaires disposent désormais d'un outil précieux pour planifier et prioriser les actions à mener. Cela contribuera à préserver sur le long terme la fertilité des sols et les écosystèmes du bassin versant, en limitant les phénomènes d'érosion hydrique qui constituent une menace majeure. Cette étude illustre tout l'intérêt de coupler l'expertise terrain et les technologies de télédétection et de SIG pour une gestion durable des ressources naturelles.

Ces résultats constituent une base de connaissances solide pour orienter la mise en œuvre d'une gestion intégrée et durable du bassin versant de l'oued Amtar. Ils permettront notamment de cibler prioritairement les interventions de lutte contre l'érosion, de restauration des écosystèmes et de protection des ressources en eau et sol. Une approche concertée, impliquant l'ensemble des acteurs du territoire, sera essentielle pour assurer l'efficacité et la pérennité de ces actions.

Au-delà de cette application immédiate, l'analyse morphométrique réalisée ici pourrait également être reproduite sur d'autres bassins versants présentant des enjeux similaires, contribuant ainsi à une meilleure connaissance et gestion des milieux hydrologiques à l'échelle régionale.

CHAPITRE V : ÉVALUATION DU RISQUE DE L'ÉROSION HYDRIQUE DANS LE BASSIN VERSANT DE L'OUED AMTAR PAR L'EQUATION RUSLE

Résumé du chapitre V

La présente étude vise à estimer les pertes en sol dans le bassin de l'oued Amtar, situé dans le domaine interne rifain, dans la région de Tanger-Tétouan-Al Hoceima, province de Chefchaouen, au nord-ouest du Maroc. La spatialisation du modèle empirique s'est basée sur l'intégration de cinq facteurs dans le Système d'Information Géographique : l'érosivité des pluies, l'érodibilité des sols, la couverture végétale, la topographie et les pratiques antiérosives. La superposition de ces facteurs a permis d'élaborer une carte quantitative des pertes de sol à l'échelle du bassin versant.

Le bassin de l'oued Amtar couvre une superficie de 300 km², avec une forme allongée et une altitude variant de 0 m à 2100 m du nord au sud, et une pente allant de 0 à 58,58 %. L'étude des précipitations des stations climatiques situées à proximité du bassin a révélé une irrégularité des pluies dans le temps et dans l'espace. L'indice d'érosivité R a montré des valeurs allant de 1637,09 à 1937,61, avec une moyenne de 1787,35 Mj.mm/ha.h.an (millijoule, millimètres/hectare/heure/an). L'indice d'érodibilité K, quant à lui, présente des valeurs de 0,139 à 0,140, indiquant que les sols peu évolués et les vertisols sont les plus vulnérables à l'érosion.

Mots-clés : Oued Amtar ; Bassin versant ; Érosion hydrique ; Modèle RUSLE ; Sensibilité des sols.

V.1. Définitions

L'équation universelle révisée de perte de sol (RUSLE) est utilisée par de nombreuses agences gouvernementales, organisations privées et particuliers pour évaluer le degré d'érosion des rigoles et entre les rigoles, identifier les situations où l'érosion est grave et guider l'élaboration de plans de conservation pour contrôler l'érosion. RUSLE a été appliqué sur les terres cultivées, les parcours, les terres forestières perturbées, les décharges, les chantiers de construction, les sites miniers, les terres récupérées, les terrains d'entraînement militaire, les parcs, l'élimination des déchets et d'autres utilisations des terres où les matériaux minéraux du sol sont exposés aux forces érosives d'impact des gouttes de pluie et écoulement de surface.

V.2. Introduction

La modélisation est une représentation des phénomènes physiques afin de mettre en œuvre la réalité surplace en modèle réduit pour pouvoir l'utiliser à des fins pratiques (Mourad, 2005). Elle consiste d'abord à construire un prototype, concret ou conceptuel, qui servira de modèle à une construction réelle. Le modèle ainsi élaboré représente les concepts de manière simplifiée d'une chose réelle déjà existante en vue de la comprendre et de prédire ses comportements (Ranivoson, 2007).

Les modèles d'érosion s'avèrent importants et appréciables si l'on veut avoir une évaluation rapide du rythme de la perte en sol dans une région donnée, ou établir une échelle d'intensité des processus afin de prioriser les interventions antiérosives ou mettre à jour la sensibilité des sols à l'érosion hydrique (Nasl'haj, 2009).

En d'autres termes, la modélisation est une méthode qui est utilisée pour : simuler la réalité et optimiser la gestion des phénomènes étudiés, Evaluer les cas extrêmes envisageables et faciliter les calculs à l'aide des outils informatiques à fin d'éviter les redondances de calcul. Il existe plusieurs modèles d'érosion hydrique ont été développés pour étudier, quantifier et lutter contre ce fléau. On peut les regrouper en deux grands types : les modèles qualitatifs et quantitatifs.

Pour les modèles qualitatifs, ils présentent une vue générale d'un problème ou d'un processus à analyser sous forme d'un canvas représentant la structure du système et les relations qui y existent entre eux.

Pour les modèles quantitatifs qui permettent une évaluation quantitative du processus. L'érosion hydrique estimée par ces modèles tient compte de l'incidence de la majorité des facteurs. Ces modèles sont mis au point à partir des données acquises expérimentalement sur le terrain ou des données de télédétection spatiale gérées par un Système d'Information Géographique (SIG). Parmi ces modèles, on peut citer : les modèles physiques et empiriques.

- Les modèles physiques : reposent sur des équations mathématiques pour reproduire le processus d'érosion hydrique en formulant leurs différentes étapes physiques (Company- Redmond, 1996).

- Les modèles empiriques : consistent à établir une loi mathématique qui relie la variable d'entrée à des variables de sortie, dont la forme et les coefficients sont fixés à l'aide d'observations et de mesures sur le terrain. Ceci est effectué d'une façon expérimentale en

Ajustant les valeurs calculées par le modèle à celles mesurées sur le terrain. Ces modèles ont été créés pour jouer un rôle opérationnel, c'est-à-dire comme outil de conservation des sols et de lutte contre l'érosion hydrique (Company-Redmond, 1996). Le modèle empirique le plus célèbre est celui de Wischmeier et Smith (1958, 1978), il s'appelle aussi l'équation universelle des pertes des sols (USLE). Ce dernier est le modèle adopté pour notre cas d'étude (érosion hydrique du bassin versant de l'oued Amtar).

V.2.1. Aperçu sur l'équation de Wischmeier et Smith (USLE)

L'équation universelle des pertes en sols (USLE) de Wischmeier et Smith (1958 & 1978) est le modèle d'érosion hydrique le plus utilisé pour estimer et prévoir les pertes des sols à l'échelle de la parcelle et à l'échelle du bassin versant. L'équation a été développée à partir de plusieurs années d'observations du ruissellement et des transports solides à l'exutoire de parcelles et bassin versant aux pentes uniformes.

Le modèle empirique de calcul des taux d'érosion la plus largement admise et utilisée aux Etats Unis au Centre National du Ruissellement et de Calcul de Perte en Sol en 1954. Des projets de recherches ont été abouti à la mise au point, d'un modèle empirique de prévision de perte en sols par Wischmeier et Smith en 1958, mais n'a été publié en détail qu'en 1965 (Sadiki, 2005). Par la suite le modèle a été utilisé dans le monde entier.

Cependant, ce modèle présente certaines limitations puisqu'il ne prend en compte que les processus d'érosion en nappe à l'échelle de la parcelle et ne permet pas d'aborder le phénomène à l'échelle d'un événement pluvieux (averse). Pour lever ces limites, le modèle a été révisé, modifié et amélioré, sous plusieurs versions en lui intégrant des facteurs de ruissellement pour l'adapter à l'échelle d'un événement pluvieux (Onstad et Foster, 1975 ; Williams, 1975 ; Renard et al., 1997).

En effet, l'équation universelle est passée d'USLE « Universal Soil Loss Equation » (Wischmeier et Smith, 1978) à DUSLE « Differential Universal Soil Loss Equation ». Cette dernière prend en compte la complexité topographique par l'utilisation du Modèle Numérique du Terrain (MNT) et des pratiques antiérosives. MUSLE « Modified Universal Soil Loss Equation » (Williams, 1975) quant à elle permet de prévoir la production en sédiments à l'échelle de l'événement hydrologique en intégrant tous les

facteurs d'érosion. Le changement apporté dans cette équation consiste à remplacer le facteur R par le volume ruisselé V_r (m^3) et le débit de pointe Q_p (m^3/s) d'une averse donnée (Ezzine, 1998).

Enfin RUSLE « Revised Universal Soil Loss Equation » (Renard et al., 1997) qui améliore la détermination des différents facteurs de l'érosion.

Cette approche est considérée comme étant le modèle qui demande le moins de données sources et il a été appliquée largement à toutes les échelles. Il est créé pour estimer des taux annuels d'érosion hydrique sur le long terme dans les zones agricoles à l'échelle de la parcelle (Desmet et Govers, 1996).

V.2.2. Le modèle révisé de USLE : RUSLE

Pour des raisons de précision le modèle USLE a été révisé et remplacé par le modèle RUSLE « Revised Universal Soil Loss Equation ». RUSLE se présente sous forme d'une équation mathématique similaire

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

à l'USLE. Le modèle intègre l'ensemble des facteurs qui déterminent le phénomène d'érosion comme entrées, pour estimer les pertes en sols moyennes annuelles résultantes de l'érosion en nappe et en rigole (Toy et al., 2002). Il tient en compte des conditions climatiques, édaphiques et l'utilisation du sol du Maroc.

Le modèle RUSLE est adopté au Maroc depuis 1989, par le Ministère délégué auprès du ministère de l'Agriculture, du Développement Rural et des Pêches Maritimes, chargé des Eaux et Forêts a conclu, avec le PNUD et la FAO dans le cadre de la politique d'étude et d'aménagement des bassins versants (Jilali, 2013).

Cette approche a été utilisée par plusieurs chercheurs dans le monde entier, et particulièrement au Maroc pour évaluer et cartographier le risque d'érosion hydrique (Anys et al, 1992 ; Benmoussa et al, 1993 ; Tahri et al, 1993 ; Cherkaoui-Omari et al 1996 ; El Garouani et al, 2003, 2005, 2007, 2008 ; Sadiki et al, 2004 ; Tribek et al, 2009, 2012, Merkhi et al, 2015 ; Elalaoui et al, 2015 ; Issa et al, 2016 ; Ouallali et al, 2016 ; Tahiri et al, 2017, Benzougagh et al., 2020 ; El Brahimi et al., 2024). Ce modèle ne prend pas en considération les processus d'érosion comme le détachement, le transport et le dépôt, pour estimer les pertes en sol (Jones et al., 1996).

La formule empirique de Wischmeier et Smith (1978) permet d'estimer le taux de perte en sol . Elle est le modèle mathématique combiné avec les techniques de SIG, utilisé souvent dans le monde pour quantifier les pertes en sol. Cette équation est basée sur de très nombreuses expérimentations sur parcelles agricoles aux USA. Elle se base sur 5 facteurs majeurs explicatifs de l'érosion hydrique, ils sont le climat ©, le sol (K), la topographie (LS), la végétation ou la culture © et les pratiques d'utilisation des sols (P). Elle prédit les pertes moyennes de sol au champ, pertes qui sont provoquées par l'érosion

Évaluation des risques d'érosion de surface et profonde à oued Amtar (Rif, Maroc)

Apport des outils géomatiques et de machine Learning

de surface (érosion par l'impact des gouttes de pluie ou la battance, érosion en nappe et érosion en rigole). Elle se formule par la relation :

Avec :

- **A** : Taux annuel de perte en sol en t/ha/an.
- **R** : Indice d'érosivité potentielle de la précipitation ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$).
- **K** : Indice d'érodabilité des sols à l'érosion hydrique).
- **LS** : Facteur topographique dépendant de la pente et sa longueur.
- **C** : Facteur de couverture végétale, et les pratiques culturales.
- **P** : Facteur des pratiques culturales antiérosives et de conservation et d'aménagement.

L'équation est une fonction multiplicative des facteurs de l'érosion hydrique de telle sorte que celle-ci s'annule si l'un des facteurs tend vers zéro. Leur utilisation de cette équation nécessite l'évaluation des différents facteurs sur toute la superficie du bassin versant et leur expression sous forme des cartes thématiques.

L'intégration de ces cartes dans les systèmes d'information géographique (SIG), se fait par numérisation et l'application des équations mathématiques du modèle de Wischmeier et Smith pour évaluer le taux d'érosion hydrique sur tous les point du bassin versant de l'oued Amtar et l'élaboration de la carte synthétique des pertes en sol selon l'organigramme méthodologique suivant (*Figure 45*).

- .

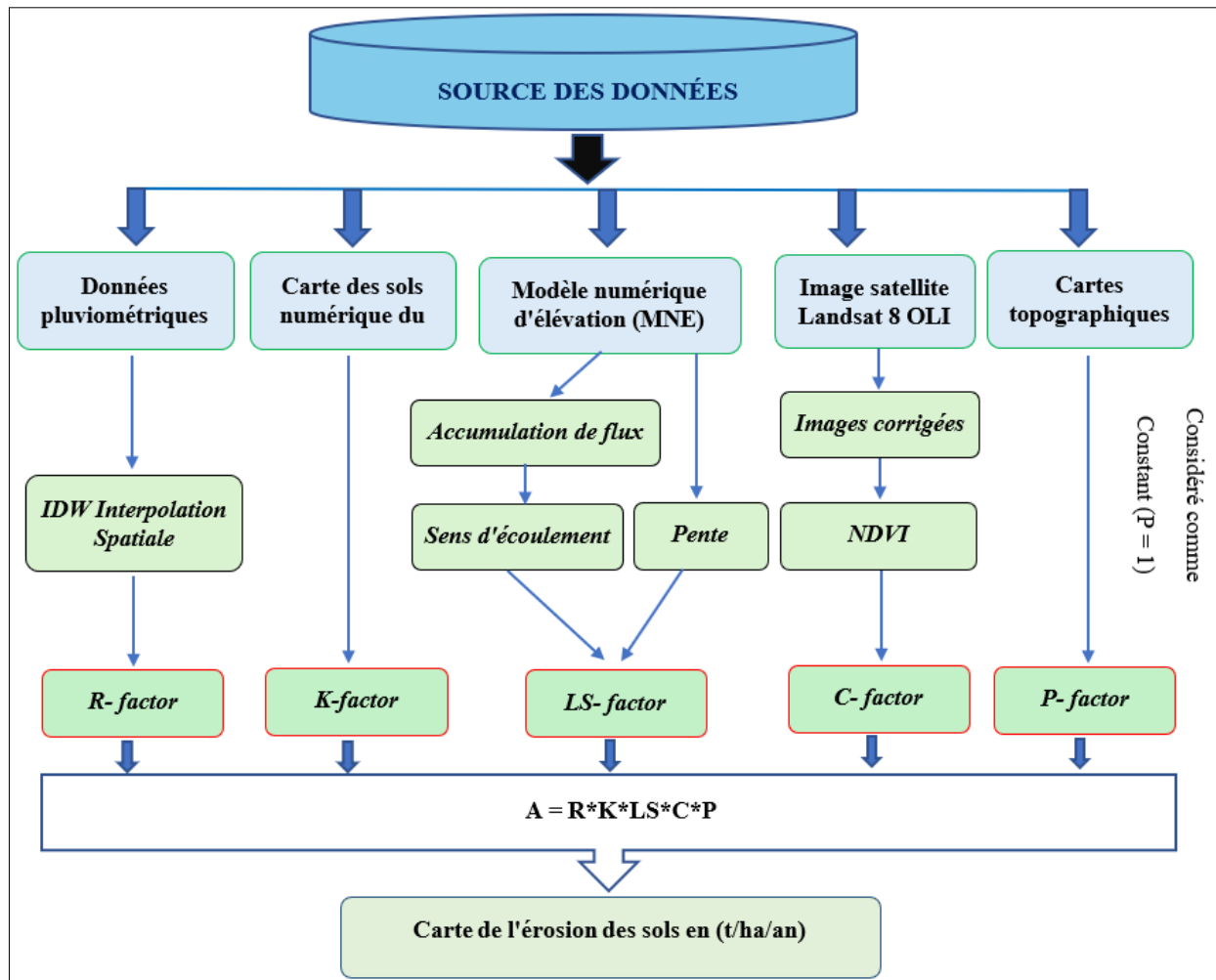


Figure 45 : Schéma méthodologique adopté pour déterminer les zones vulnérables aux risques d'érosion par RUSLE

V.3. Description des facteurs d'érosion

V.3.1. Facteur R : Erosivité pluviale

L'énergie cinétique de la pluie contribue fortement à l'arrachement des particules solides. Elle est liée à l'intensité des pluies et dépend de la taille et de la vitesse de chute des gouttes. L'estimation du facteur de l'agressivité climatique selon la formule de Wischmeier et Smith (1978) nécessite la connaissance de l'énergie cinétique et l'intensité moyenne des pluies durant 30 minutes. Or, au niveau des stations climatiques de références du bassin versant de l'oued Amtar (Tableau 22), seules les données pluviométriques moyennes mensuelles et annuelles sont disponibles. Ainsi, l'équation appliquée est celle développée par Renard et Freimund (1994) qui se présente comme suit :

$$R = 0.04830P^{1.610} \quad \text{if } P < 850$$

$$R = 587.5 - 1.219P + 0.004105P^2 \quad \text{if } P > 850$$

Avec :

Évaluation des risques d'érosion de surface et profonde à oued Amtar (Rif, Maroc)

Apport des outils géomatiques et de machine Learning

- **R** : L'érosivité de la pluie (MJ mm ha).
- **P** : la pluviométrie annuelle (mm).

À partir des mesures ponctuelles de l'agressivité climatique R effectuées à chacune des 13 stations, une interpolation spatiale a été réalisée. Cela a permis de produire une cartographie de la répartition géographique de l'indice R sur l'ensemble du bassin versant (*Figure 46*).

Tableau 22 : Données pluviométriques des stations de référence

Station	Latitude	Longitude	Altitude	Précipitations annuelle	R
Bab ouender	34,6	-4,55	480	517	1316,434
Ourtzagh	34,62	-5,01	188	468	1190,896
Amzal	35,26	-5,26	67	353	896,266
Bab berred	35	-4,89	1220	642	1636,684
Bab taza e&f	35,03	-5,13	880	700	1785,28
Beni boufrah	35,1566	-4,3244	564	545	1388,17
Chefchaouen	35,1	-5,14	584	891	2274,622
Jbel outka	34,76	-4,77	1530	1458	3727,276
Kouriren	35,372	-5,176	30	586	1493,212
Tabouda	34,73	-5,13	563	642	1636,684
Targuist	34,94	-4,32	1037	316	801,472
Tétouan	35,35	-5,22	81	585	1490,65
Dardara	35,11	-5.29	391	835	2131,15

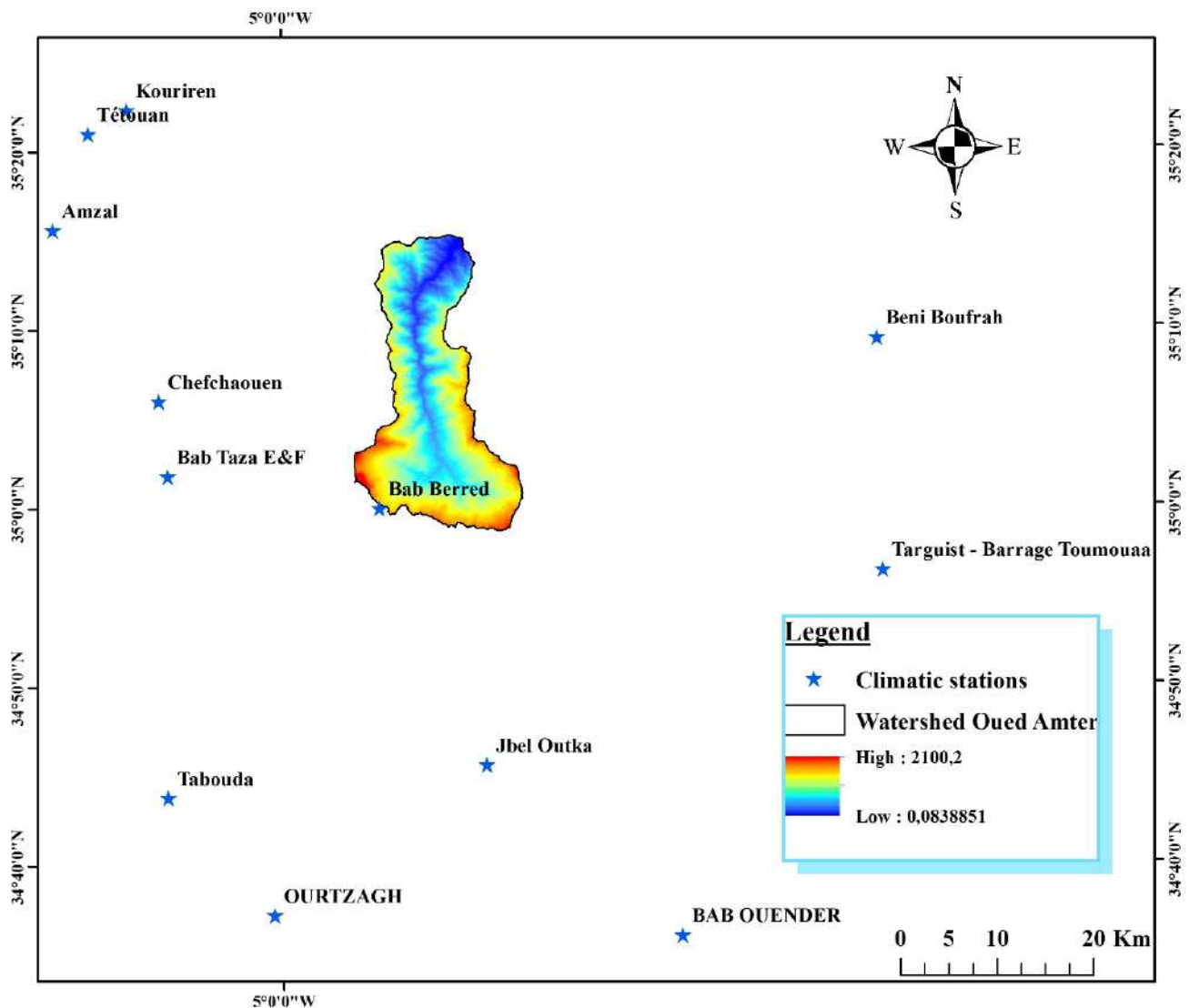


Figure 46 : Carte de répartition des stations climatiques dans la région du bassin versant de l'oued Amtar

Les données pluviométriques des stations de référence ont servi au calcul du facteur R, selon la formule de Renard et Freimund (1994) sus-indiquée. La spatialisation de ce facteur sur l'ensemble du bassin versant de l'oued Amtar a été réalisée par la méthode d'interpolation via l'outil SIG.

V.3.2. Facteur K : Erodibilité des sols

L'interprétation des caractéristiques pédologiques de la zone cible a permis de classer les faciès dans l'abaque de Wischmeier et Smith (1978) afin d'obtenir des valeurs approximatives du facteur K en fonction des paramètres de la matière organique, de la structure, de la texture et de la perméabilité. Le facteur K est déterminant dans l'équation de Wischmeier et Smith (1978), du moment qu'il reflète le degré d'érodibilité des sols à travers la détermination de leur composition. Bien que la détermination de ce paramètre soit difficile, son estimation s'est basée sur l'analyse des échantillons des sols prélevés dans la zone d'étude en appliquant l'équation suivante (Wischmeier et Smith, 1978) :

Évaluation des risques d'érosion de surface et profonde à oued Amtar (Rif, Maroc)
Apport des outils géomatiques et de machine Learning

$$K = \left[0.2 + 0.3 \exp \left(0.0256 SAN \left(1 - \frac{SIL}{100} \right) \right) \right] \times \left(\frac{SIL}{CLA} + SIL \right)^{0.3} \times \left[1 - \frac{0.25C}{c + \exp(3.72 - 2.95C)} \right] \\ \times \left[1 - \frac{0.7SN1}{SN1 + \exp(-5.51 + 2.9SN1)} \right]$$

Avec :

- **SAN** : Fraction de sable du sol ;
- **SIL** : Fraction de limon ;
- **CLA** : Fraction d'argile (%).
- **C** : Teneur en carbone de la couche arable (%).
- **SN1** = 1 - SAN/100.

Les valeurs de K ont été calculées à partir des données de la FAO, (World Digital Soil Map, 2019) <http://www.fao.org/geonetwork/srv/en/metadata>), en raison du manque de données sur la lithologie du bassin de l'oued Amtar.

V.3.3. Facteur LS : Topographie

Le facteur topographique (LS) est primordial dans le comportement érosif dans ces zones de hautes montagnes où la topographie devient déterminante dans les différentes phases du processus d'érosion, surtout dans la phase de transport des sédiments, ainsi que la longueur et l'inclinaison des pentes. Plus leurs valeurs augmentent, plus l'érosion est active sur les versants, et plus le ruissellement est élevé et les risques d'inondations forts.

Le facteur LS est un indice topographique (sans dimension), qui représente la morphologie du terrain. Il est calculé à partir du Modèle Numérique du Terrain (MNT) par superposition des cartes de longueur de pentes L en (m) qui conditionne la vitesse de ruissellement et le transport des particules arrachées (Tahiri et al, 2017) et leurs degrés d'inclinaison S (%) des pentes qui influencent considérablement l'érosion hydrique des sols (Roose, 1994).

Elle aggrave l'effet du ruissellement des eaux de pluie, ainsi qu'il représente l'effet de la géomorphologie sur l'érosion hydrique. Pour estimer ce facteur la formule de (Moore and Wilson, 1992) a été adoptée :

$$LS = \left(FA \times \frac{CellSize}{22.13} \right)^{0.4} \times \left(\frac{\sin(slope)}{0.0896} \right)^{1.3} \quad (Eq.5)$$

Avec :

FA : carte d'accumulation des flux (Le débit total accumulé sur la base d'une trame dans chaque cellule, pondéré pour toutes les cellules qui s'écoulent dans chaque cellule en aval.)

Cellsize : la taille de la cellule de la grille dérivée de la résolution de 30 m du MNT.

Slope : carte des pentes exprimée en degré.

V.3.4. Facteur C : Couvert végétal

Le facteur C de l'équation RUSLE, permet de quantifier l'effet protecteur de la couverture végétale sur l'érosion des sols. Ce facteur prend en compte l'influence de l'ensemble des pratiques culturales et des techniques de gestion de la végétation, que ce soit dans un contexte agricole ou dans le cadre de mesures de lutte antiérosive. Ses valeurs vont de 0.001 pour les sols bien couverts, à 1 pour les sols nus (Wischmeier et Smith, 1978). La carte d'occupation du sol a été élaborée à partir d'une image Landsat 8 prise le 18/07/2019, qui a été préalablement traitée, en utilisant l'indice de végétation normalisé NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) permettant de distinguer les terrains nus de ceux boisés (Jensen, 2000 ; Tahiri et al, 2017).

La réalisation d'une classification non supervisée, suivie d'une classification supervisée ont permis d'avoir la répartition de la couverture végétale dans la zone d'étude en se basant sur les compositions colorées des bandes de l'image (bandes 3, 4 et 5). Le NDVI est donné par la formule :

$$\text{NDVI} = \text{PIR} - \text{R} / \text{PIR} + \text{R}$$

Avec :

- **PIR** : Bande du Proche Infrarouge ;
- **R** : bande du Rouge).

Pour la version Landsat 8, $\text{NDVI} = \text{B5} - \text{B4} / \text{B5} + \text{B4}$ (où B5 : Bande 5 qui représente PIR, B4 : Bande 4 représente le Rouge). Rappelons à juste titre, que la totalité des ressources végétales de ce territoire est soumise à une pression accrue liée au surpâturage et au prélèvement du bois de feu pour usage domestique (cuisson, chauffage), en plus des aléas inhérents aux changements climatiques dont les effets les plus marquants se manifestent par des périodes de sécheresses successives et d'extrêmes événements pluviométriques sous forme d'orages qui aggravent davantage les actions érosives et les pertes massives en sol.

Le facteur C traduit numériquement la capacité de la couverture végétale à réduire l'impact des précipitations et du ruissellement sur l'érosion des sols. Il intègre des paramètres tels que le type de culture, les dates de semis, les rotations, les pratiques de travail du sol, ou encore l'utilisation de cultures de couverture (*Tableau 23*).

Tableau 23 : Les principales valeurs du facteur C (couvert végétal) pour différents types d'occupation du sol :

Type d'occupation du sol	Facteur C
Forêt dense	0.001
Forêt ouverte	0.001
Agriculture	0.5
Arbustes	0.1
Végétation à faible couverture	0.2
Sol nu	1
Urbain	0.15
Eau	0

V.3.5. Facteur P : Pratiques antiérosifs

C'est un paramètre qui permet de prendre en considération les aménagements antiérosifs existants dans l'estimation des pertes en sols des bassins versants. Chacune de ces mesures a un degré de protection dont le coefficient est établi suivant son efficacité à réduire le ruissellement et à atténuer les causes d'érosion (Benzougagh et al., 2020). Parmi les pratiques les plus efficaces de conservation des sols, on cite à titre indicatif, les cultures en courbes de niveau, les cultures en bandes alternées ou en terrasses, les reboisements en banquettes, le buttage et le billonnage (Zouagui et al., 2018 ; Oudjane, 2021). Les valeurs du facteur P varient selon les pratiques culturelles mises en place et aussi selon la pente (Tableau 24). elles sont inférieures ou égales à 1, et le maximum est attribué aux terrains sur lesquels aucune des pratiques citées n'est utilisée (Shin, 1999).

Tableau 24 : Les différentes valeurs du facteur P (Wischmeier & Smith, 1978).

Culture en courbe de niveau	1 à 8%	61 à 122 m	0.5
Culture en courbe de niveau	1 à 8%	61 à 122 m	0.5
Culture en courbe de niveau	9 à 12%	36 m	0.6
Culture en courbe de niveau	13 à 16%	24 m	0.7
Culture en courbe de niveau	17 à 20%	18 m	0.8
Culture en courbe de niveau	21 à 25%	15 m	0.9
Culture en courbe de niveau avec bandes enherbées	1 à 8%	30 à 40 m	0.25 à 0.5
Culture en courbe de niveau avec bandes enherbées	9 à 16%	24 m	0.3 à 0.6
Culture en courbe de niveau avec bandes enherbées	17 à 25%	15 m	0.4 à 0.9

Dans le cas du bassin versant de l'oued Amtar, nous avons observé lors de nos prospections dans la région que les terrains sont majoritairement à vocation pastorale, et les pratiques culturales sont limitées aux petites parcelles sur les berges de part et d'autre des cours d'eau, essentiellement du réseau principal ; aussi, sur la base des données relatives aux pratiques existantes et leur répartition dans le bassin versant, nous avons attribué des valeurs approximatives à ce facteur, selon le type d'occupation et les pratiques culturales menées.

V.3.6. Calcul de la dégradation spécifique des sols

Pour évaluer les quantités des charges érodées et acheminées à l'exutoire, il est impératif de prendre en compte le facteur de correction qui est fonction de la dénivelée du sous-bassin et de la longueur du cours d'eau principal, étant donné que le modèle RUSLE utilisé ne permet d'estimer que l'érosion produite sur les versants. Ce coefficient (delivery ratio) a été défini par Hession et Shanholz (1988) selon l'équation suivante :

$$DR = 10.D / L$$

Avec :

- DR : Coefficient de transport ;
- D : Dénivelée du bassin versant ;
- L : Longueur du Thalweg principal.

V.4. Résultats et Discussion

V.4.1. Résultats des facteurs

V.4.1.1. Facteur R : Erosivité pluviale

Après le calcul du facteur R au niveau des stations de référence selon la formule de Renard et Freimund (1994), une interpolation a été effectuée à l'aide de l'outil SIG en vue de spatialiser ce facteur sur l'ensemble du bassin versant de l'oued Amtar. Les résultats obtenus sont relatés dans le (*Tableau 25*), et (*Figure 47*).

Tableau 25 : Calcul du facteur R dans les stations de référence.

Stations	Précipitations annuelle	Facteur d'érosivité ©
BAB OUENDER	517	1316,434
OURTZAGH	468	1190,896
Amzal	353	896,266
Bab Berred	642	1636,684

Bab Taza E&F	700	1785,28
Beni Boufrah	545	1388,17
Chefchaouen	891	2274,622
Jbel Outka	1458	3727,276
Kouriren	586	1493,212
Tabouda	642	1636,684
Targuist	316	801,472
Tétouan	585	1490,65
Dardara	835	2131,15

Ce tableau présente les valeurs de l'indice d'agressivité climatique © pour 13 stations pluviométriques réparties dans le bassin versant de l'oued Amtar. L'indice R caractérise le potentiel érosif des précipitations, en tenant compte de leur intensité et de leur répartition saisonnière. On observe une forte variabilité spatiale de l'agressivité climatique (C), avec des valeurs allant de 801,472 à Targuist, jusqu'à 3727,276 au Jbel Outka. Cette hétérogénéité du potentiel érosif des pluies s'explique par les différences d'altitude, d'exposition aux vents dominants et de régimes pluviométriques au sein du bassin versant.

Les zones les plus sujettes à l'érosion hydrique semblent être celles avec les valeurs de © les plus élevées, comme le Jbel Outka (3727,276), Chefchaouen (2274,622) et Bab Taza (1785,28). Ces secteurs nécessiteront des mesures de protection des sols et de lutte antiérosive plus importantes. À l'inverse, les zones avec un indice (C) plus faible, comme Targuist (801,472) ou Amzal (896,266), présenteront un risque d'érosion moindre. Cela permettra de cibler prioritairement les interventions dans les zones les plus critiques.

Le facteur R varie de manière significative dans le bassin, allant d'une valeur faible de 1637,11 dans les zones amont à une valeur élevée de 1937,95 dans les parties aval. Cela indique que les précipitations sont plus érosives dans les zones à plus faible altitude. La répartition spatiale du facteur R montre un gradient sud-nord, avec les valeurs les plus élevées concentrées dans la partie méridionale du bassin. Cela suggère que les zones les plus à risque d'érosion hydrique se situent dans cette partie du bassin (*Figure 47*).

Le réseau hydrographique de l'oued Amtar et de ses affluents est bien représenté sur la carte. Cela permet d'identifier les zones à fort ruissellement où l'énergie des écoulements peut contribuer à une érosion importante des sols. Les municipalités d'Ijadue et Loulane, semblent être localisées dans les zones à plus forte érosivité des pluies. Une attention particulière devra donc être portée à ces secteurs en termes de mesures de protection des sols.

Cette analyse spatiale de l'agressivité climatique, combinée à d'autres données sur les caractéristiques des sols, la topographie et les pratiques de gestion, fournit des indications précieuses sur les variations spatiales du facteur R. Il est essentiel pour comprendre les dynamiques d'érosion hydrique dans ce bassin versant. Elle permet d'identifier les zones les plus vulnérables et de guider les responsables et les décideurs pour la mise en place de pratiques de gestion durable des ressources en sols dans la région.

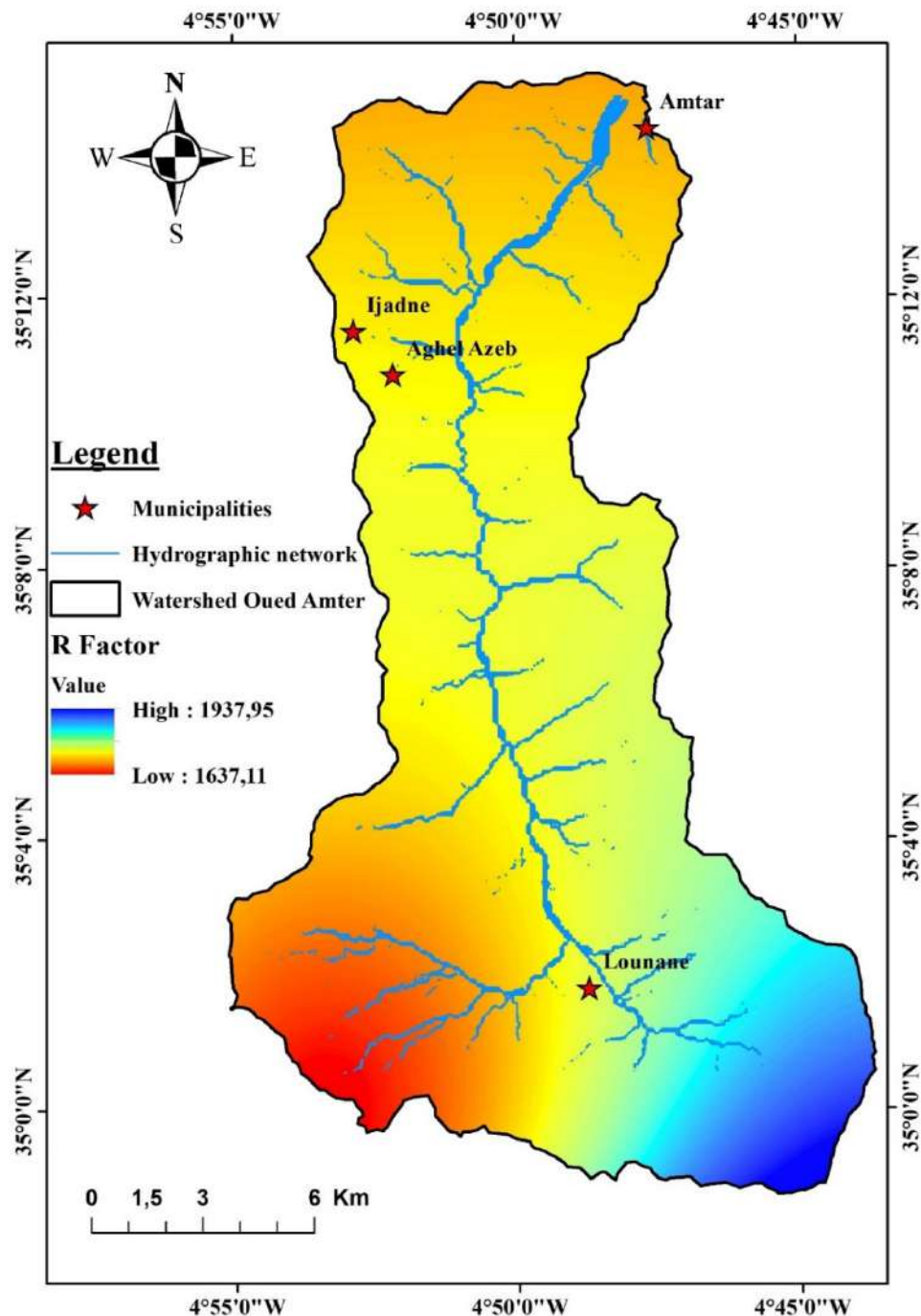


Figure 47 : Carte du facteur R du bassin versant de l'oued Amtar

V.4.1.2. Facteur K

Avant de procéder à la détermination du facteur d'érodibilité (K), il fut nécessaire d'étudier la lithologie de la roche dans la zone d'étude. Le facteur K prend en considération les caractéristiques propres du sol qui ont une incidence sur l'érosion, telles que sa texture, sa structure, sa teneur en matière organique et sa perméabilité. L'ensemble de ces propriétés détermine la propension d'un type de sol spécifique à subir l'érosion lorsqu'il est exposé à la force érosive de l'eau.

La figure (*Figure 48*). Illustre la répartition des classes lithologiques de la zone d'étude selon la base de données de la FAO ; les données géologiques font apparaître que les formations présentent des propriétés lithologiques dures et compactes. Cependant, du fait de la quasi-absence de protection végétale pérenne arbustive ou arborée, elles sont ainsi vulnérabilisées vis-à-vis des processus érosifs et sont par conséquent dans des stades très avancées d'altération.

Le facteur K varie de 0,14 à 0,139288 t ha h/ha/MJ/mm dans le bassin, indiquant une érodibilité des sols relativement homogènes sur l'ensemble du bassin. La majeure partie du bassin présente des valeurs de K autour de 0,14 t ha h/ha/MJ/mm, ce qui correspond à une érodibilité modérée des sols. Quelques zones localisées, principalement dans la partie aval du bassin, montrent des valeurs de K légèrement plus élevées, autour de 0,139288 t ha h/ha/MJ/mm, indiquant une érodibilité un peu plus forte.

Le réseau hydrographique de l'oued Amtar et de ses affluents est bien représenté, permettant d'identifier les zones de circulation préférentielle des écoulements, ce qui augmente la vulnérabilité au risque d'érosion hydrique dans le bassin versant.

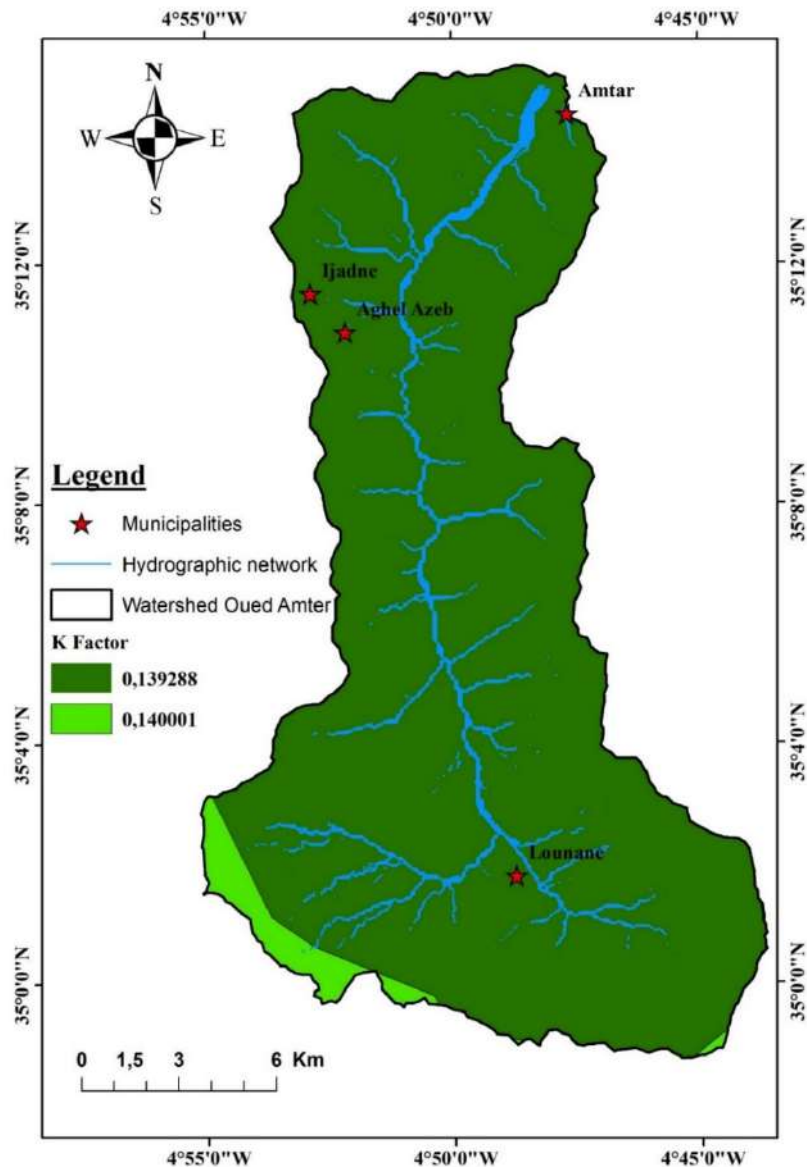


Figure 48 : Carte lithologique et classes de friabilité des roches, du bassin versant de l'oued Amtar

V.4.1.3. Facteur LS

Après la détermination des paramètres : longueur de pente (L) qui conditionne la vitesse de ruissellement et le transport des particules arrachées (Benzougagh et al., 2020), et inclinaison en % (S) qui influencent considérablement l'érosion hydrique des sols (Roose, 1994). Leurs calculs s'effectuent à partir du modèle numérique de terrain (MNT) de 12,50 m de résolution en utilisant des applications SIG, par superposition des cartes des longueurs des pentes et les gradients de pentes une carte de facteur (LS) a été élaborée tout au long du bassin versant de l'oued Amtar (Figure 49).

Les résultats obtenus pour le facteur (LS) varient entre 0 à 309. Au fur et à mesure que le débit s'accumule et que la pente augmente. La figure (Figure 49). Montre que la plupart des bassins ont une

faible (LS) avec des valeurs, près de 10 % des bassins versants ont un (LS) élevé avec des valeurs allant de 15 jusqu'à 309. Les facteurs (LS) élevés sont principalement situés dans vers les extrémités est au niveau d'agencement du réseau hydrographique du bassin.

Le facteur (LS) varie considérablement dans l'ensemble du bassin versant de l'oued Amtar, allant de valeurs très faibles (0-5) à des valeurs très élevées (150-309,061). Les zones avec des valeurs de (LS) entre 0 et 5, correspondent à des secteurs plats ou à faible pente, où l'érosion par ruissellement sera moindre. À l'opposé, les zones avec des valeurs de (LS) entre 15 et 150, indiquent des pentes plus prononcées où le risque d'érosion hydrique sera plus important. Les zones, avec des valeurs de (LS) supérieures à 150, révèlent des secteurs à très forte pente, où l'écoulement de l'eau aura une énergie suffisante pour emporter de grandes quantités de sol. Les municipalités d'Ijadue et Loulane, semblent se situer dans des zones à facteur (LS) élevé, entre 70 et 309,061, les rendant ainsi particulièrement vulnérables à l'érosion hydrique.

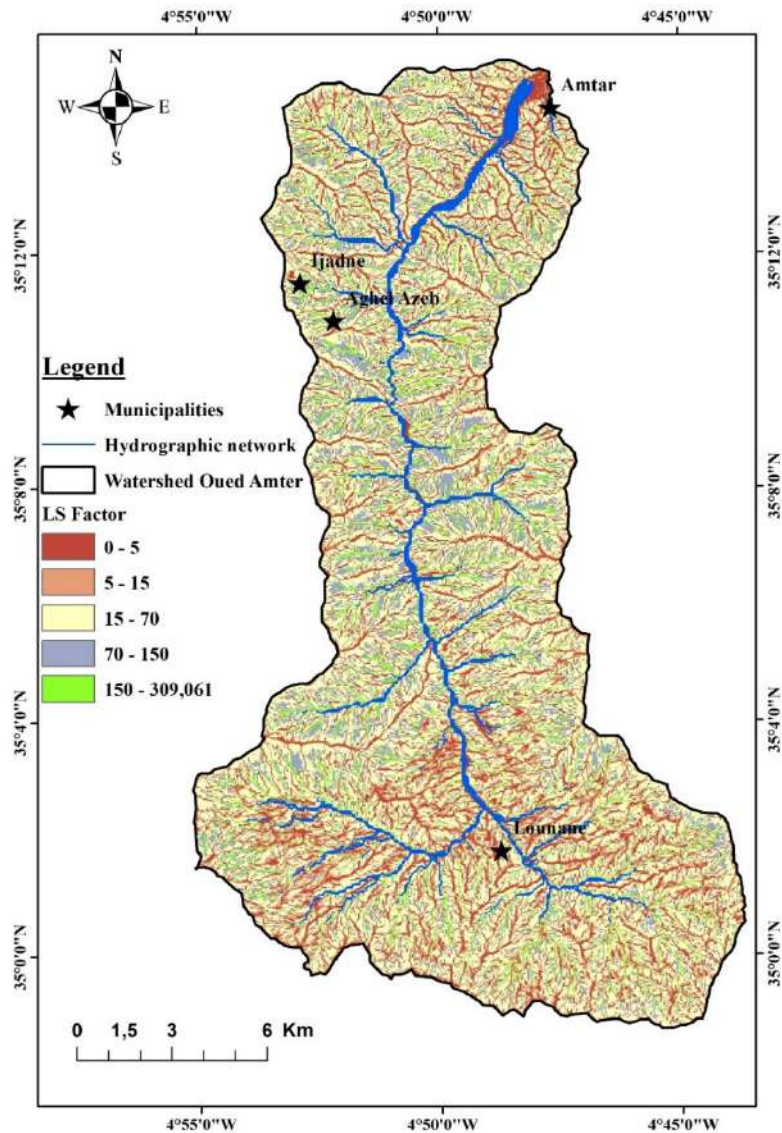


Figure 49 : Carte du facteur topographique (LS) du bassin versant de l'oued Amtar

V.4.1.4. Facteur C

L'élaboration de la carte du NDVI (*Figure 50-B*) a été faite en utilisant les images satellitaires Landsat8 ; mais, l'application du NDVI ne donne pas une variabilité permettant de distinguer nettement les classes d'occupation du sol. Cela nous a amené à utiliser les images satellite Google haute résolution, et à multiplier des missions de prospections de terrains pour établir une carte d'occupation du sol reflétant les réalités de terrain (*Figure 66*).

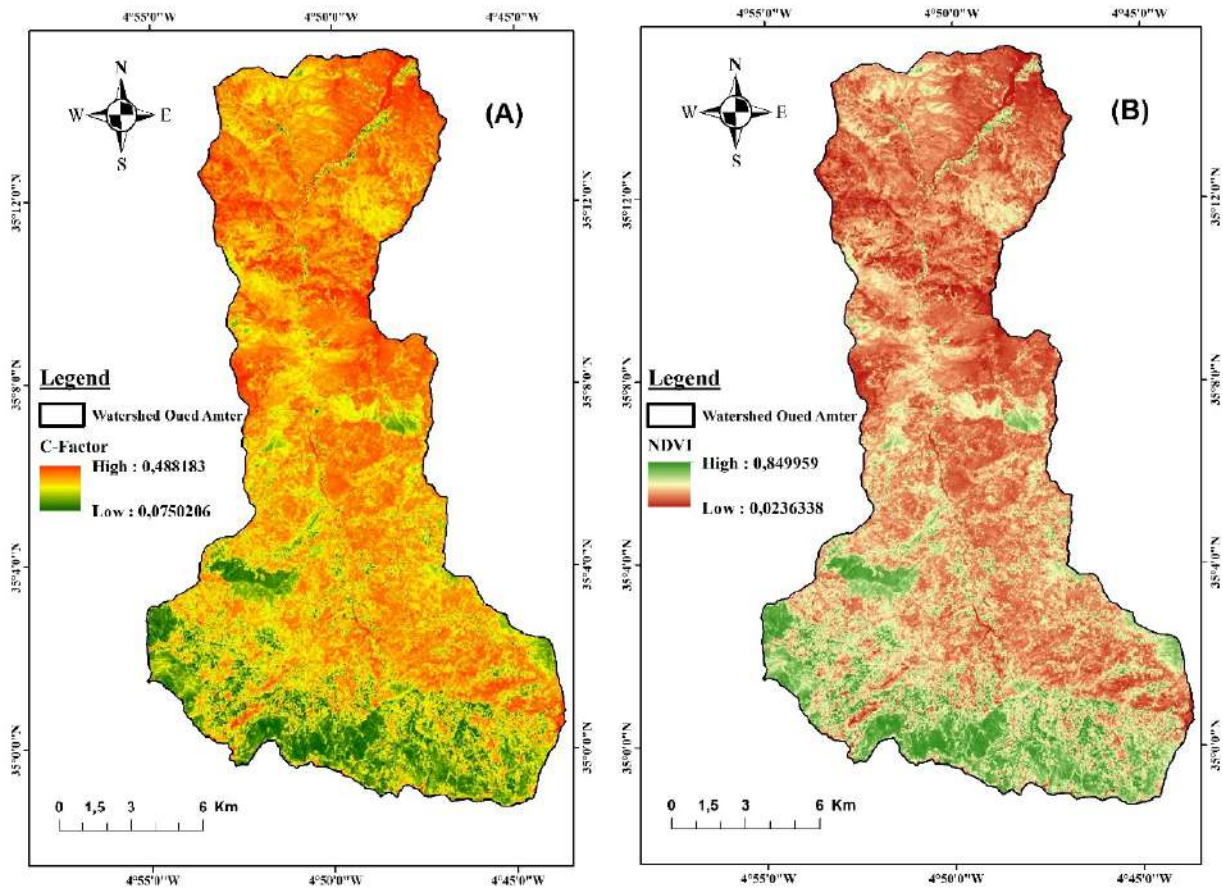


Figure 50 : (a) Carte du facteur C ; (b) Carte de l'indice de végétation par différence normalisée au niveau du bassin versant de l'oued Amtar

La figure (**Figure 50-A**). Montre que le NDVI varie considérablement dans le bassin versant de l'oued Amtar, allant de valeurs très faibles (0,0236338) à des valeurs élevées (0,849959). Les zones en vert foncé correspondent à une couverture végétale dense et vigoureuse, telles que les forêts et les cultures irriguées. Les zones en orange à rouge indiquent une faible couverture végétale, avec des sols nus, des zones urbanisées ou des cultures peu développées. La répartition du NDVI montre une alternance de secteurs à forte et faible végétation, reflétant une diversité d'occupation des sols dans le bassin versant.

La figure (**Figure 65 B**). Montre que le facteur (C) varie également de manière importante, de valeurs très faibles (0,0750206) à des valeurs élevées (0,488183). Les zones en vert foncé correspondent à des occupations du sol très protectrices vis-à-vis du risque d'érosion, comme les forêts ou les prairies permanentes. À l'inverse, les zones en orange à rouge indiquent des secteurs peu couverts, plus exposés à l'érosion hydrique, tels que les zones urbanisées ou les sols nus. La répartition spatiale du facteur (C) montre une mosaïque d'occupations du sol avec des degrés de protection variable contre l'érosion.

Ces deux cartes sont complémentaires et permettent d'identifier les zones les plus sensibles à l'érosion dans le bassin versant de l'oued Amtar, en fonction de la couverture végétale et de l'occupation du sol.

Elles constituent des outils essentiels pour orienter les stratégies de gestion durable des terres et de conservation des sols dans cette région.

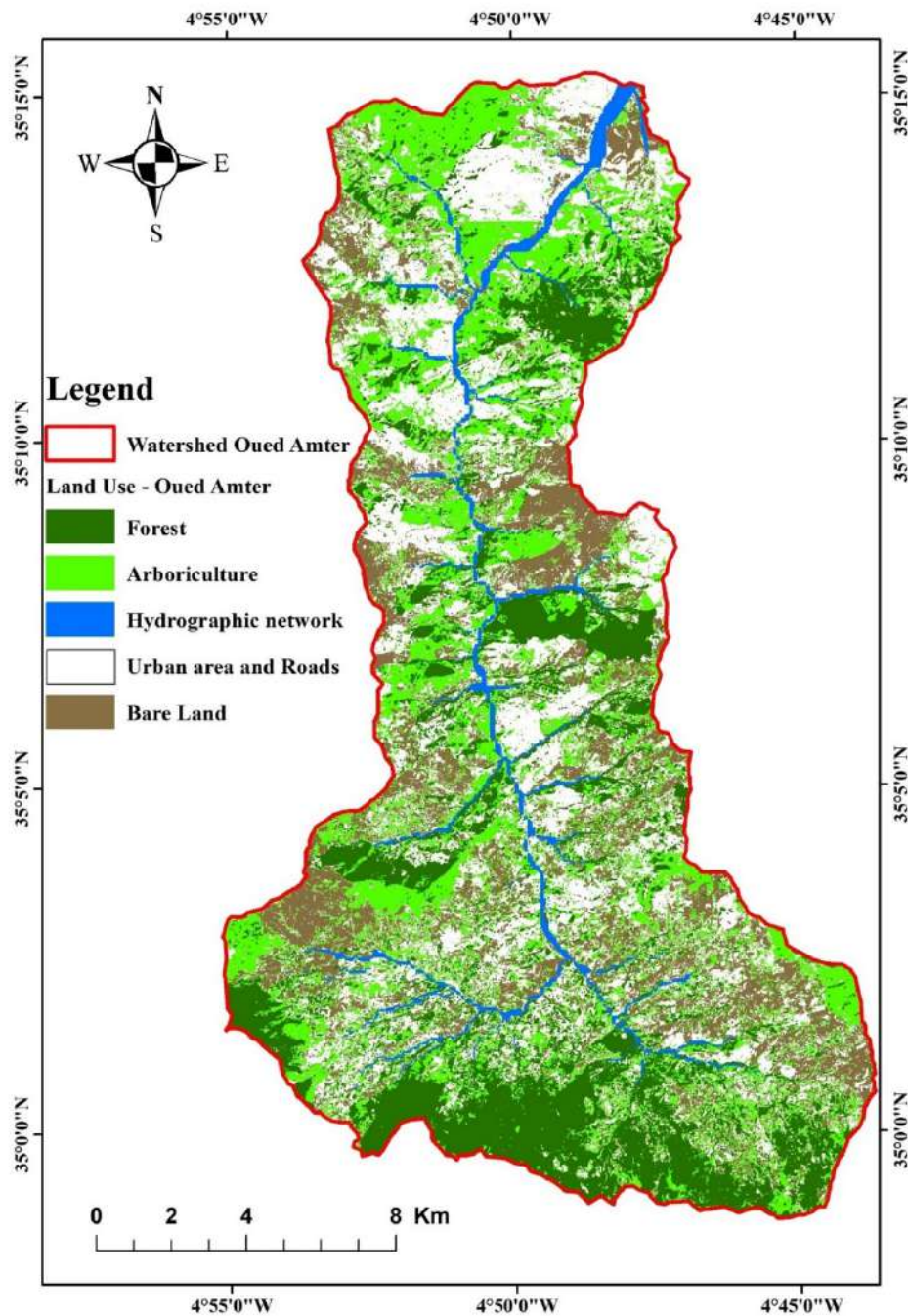


Figure 51 : Carte d'utilisation et Couverture des sols dans le Bassin Versant d'oued Amtar

V.4.1.5. Facteur P

Ce facteur permet de prendre en considération les aménagements antiérosifs existants dans le bassin versant. Ces pratiques peuvent être des labours selon les courbes de niveaux, des banquettes de reboisement, le billonnage, le buttage, les bandes alternées, etc (Morgan, 2005 ; Toubal et al., 2018 ;

Benzougagh et al., 2020). Chaque mesure a un degré de protection dont le coefficient est établi suivant son efficacité à réduire ou à atténuer les sources d'érosion. Ces zones sont censées être protégées contre l'érosion, ou au moins l'érosion n'y'est pas accentuée. Du fait que la superficie touchée par ces pratiques est négligeable par rapport à la superficie totale du bassin versant, on affecte la valeur d'un (1) à ce paramètre sur l'ensemble de la zone d'étude.

V.5. Quantification des pertes en sol (A) dans le bassin versant de l'oued Amtar.

Les résultats de l'application du modèle RUSLE (Equation Universelle Révisée de Perte en Sol), après modélisation des cinq facteurs (R, K, LS, C et P) en cartes thématiques, via SIG, ont permis l'évaluation des facteurs causaux de l'érosion et leur spatialisation sur l'ensemble du bassin versant étudier.

Selon le tableau ci-dessus (*Tableau 26*), la classification de perte en sol s'étend de 0-10 tonnes/hectare à plus de 2500 tonnes/hectare, montrant une très grande variabilité du risque érosif dans le bassin. La répartition des superficies montre que la classe dominante est celle de 50-100 tonnes/hectare, couvrant 24,35% de la superficie totale du bassin versant de l'oued Amtar, soit 69,66 km². Les classes comprises entre 10 et 300 tonnes/hectare représentent près de 75% de la superficie totale du bassin. Alors que, les classes les plus élevées (500-2500 tonnes/hectare) ne couvrent que 3,49% de la superficie, soit 10,12 km². Cependant, cette faible étendue spatiale masque l'importance des processus érosifs dans ces zones critiques.

Les classes supérieures à 1000 tonnes/hectare, bien que peu étendues (1,69 km²), correspondent à des zones où l'érosion hydrique est extrêmement élevée et nécessiterait des interventions prioritaires. Les classes de 300-1000 tonnes/hectare, couvrant 14,93 km², constituent également des secteurs à risque majeur qu'il faudrait cibler pour des mesures de conservation des sols.

Tableau 26 : Superficie et pourcentage des classes des pertes en sol en t/ha/an dans le bassin versant de l'oued Amtar.

Classes (t/ha)	Zone classée (%)	Superficie (Km ²)
0-10	18,66	53,37
10-30	12,70	36,33
30-50	15,44	44,16
50-100	24,35	69,66
100-300	21,93	62,74
300-500	3,03	8,67
500-1000	2,20	6,28

1000-1500	0,76	2,18
1500-2500	0,52	1,49
> 2500	0,41	1,17

L'évaluation des pertes en sol dans le bassin versant de l'oued Amtar montre, une grande variété de classes de perte en sol, allant de 0-10 tonnes/hectare à plus de 2500 tonnes/hectare. Cela indique une forte hétérogénéité des conditions climatiques, topographiques et d'occupation des terres dans ce bassin versant (*Figure 52*).

Les zones avec des taux de perte en sol supérieurs à 100 tonnes/hectare, représentent des secteurs très vulnérables à l'érosion hydrique (zones à risque élevé). Ces zones nécessiteraient des interventions prioritaires, comme la mise en place de mesures de conservation des sols et de la végétation. Les zones, avec des pertes inférieures à 10 tonnes/hectare, indiquent des secteurs boisés ou avec une couverture végétale dense qui limite efficacement l'érosion (Zones protégées). Ces zones devraient être préservées dans le cadre d'une gestion durable du bassin versant.

La répartition spatiale des zones à risque d'érosion montre une répartition très hétérogène des classes d'érosion dans le bassin versant de l'oued Amtar qu'est composé d'une mosaïque de milieux aux caractéristiques diverses (pentes, types de sols, pratiques agricoles, etc.). Cela nécessitera une approche différenciée pour la mise en œuvre de mesures de lutte contre l'érosion.

Les zones fortement érodées vont générer un transport solide important, pouvant dégrader la qualité de l'eau, remplir les réservoirs et infrastructures hydrauliques, et accentuer les risques d'inondation en aval. Une gestion intégrée de l'érosion est donc cruciale pour préserver les ressources en eau et en sol.

Les résultats de l'analyse de la carte RUSLE fournit des informations essentielles pour orienter les responsables locaux et les décideurs pour mettre en œuvre des stratégies de gestion durable des terres et de l'eau dans ce bassin versant. Elle permettra de cibler les zones prioritaires et d'adapter les interventions en fonction des enjeux hydro-climatiques et environnementaux.

Perte de sol potentielle annuelle totale estimée d'environ 2500 t/h/an

Taux d'érosion moyen du bassin versant est de 400 t/ha/an.

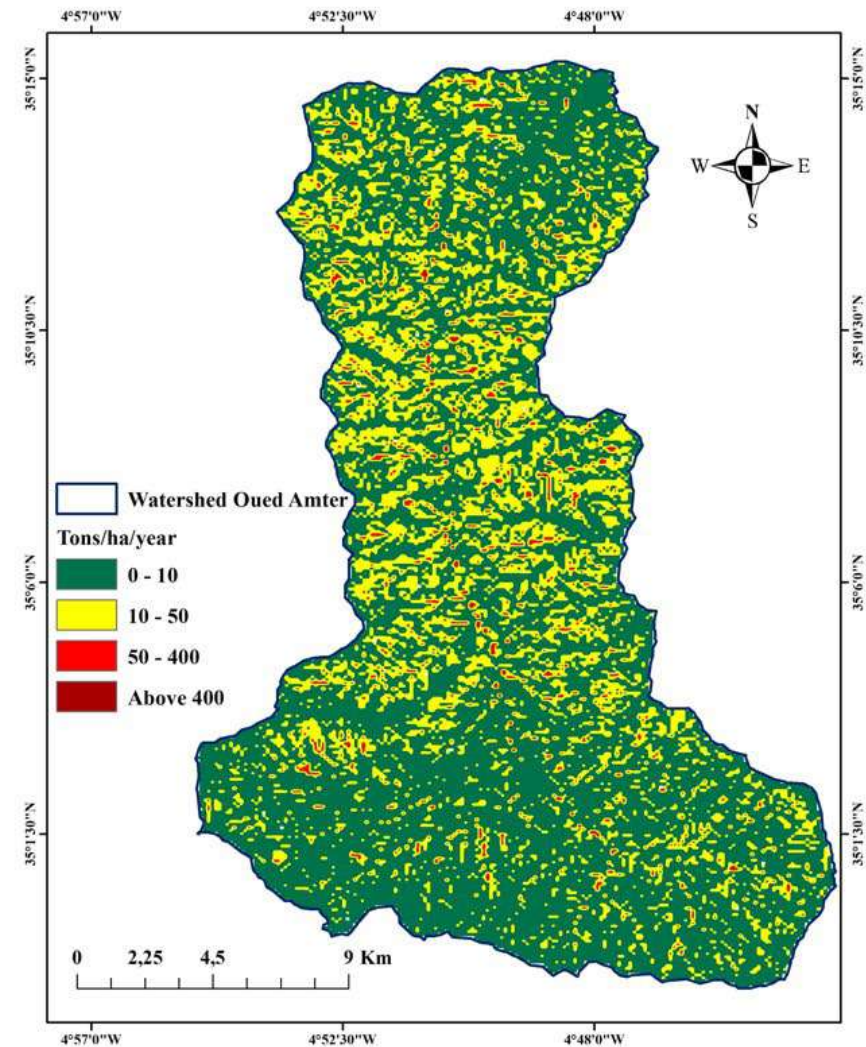
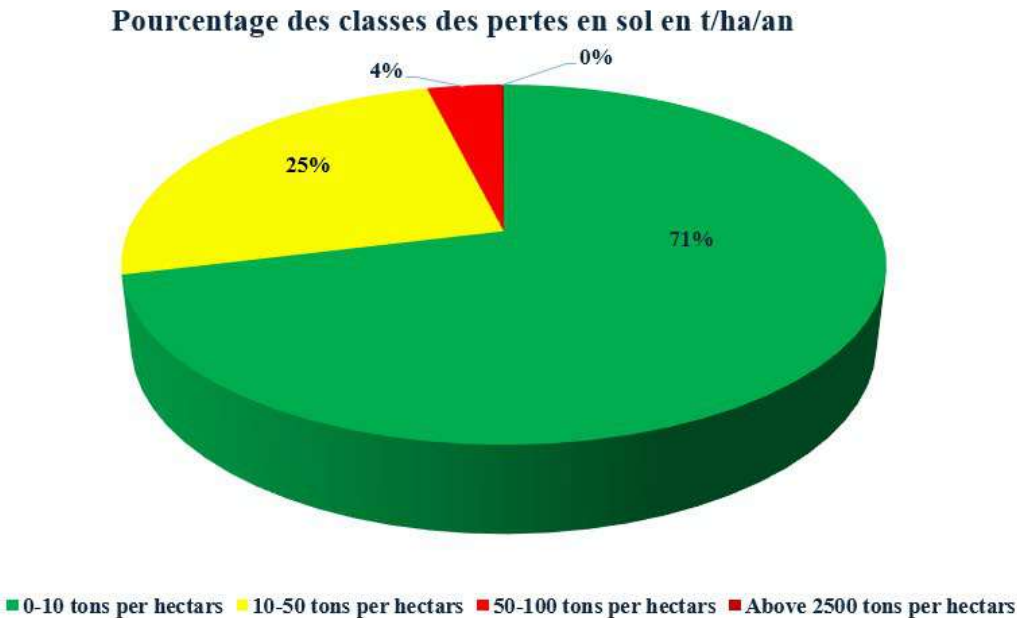


Figure 52 : Carte des pertes en sol du bassin versant de l'oued Amta

V.6. Conclusion

L'évaluation quantitative du risque de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'oued Amtar, montre une grande fragilité de ce bassin. Les sols et les formations superficielles issus de terrains essentiellement marneux ont une grande susceptibilité à l'érosion hydrique. Ceci est d'autant plus important que les terrains ont été quasi totalement dénudés et mis en culture. L'énorme perte en terres enregistrée, annuellement, montre une imbrication des facteurs d'ordre naturel et anthropique.

L'utilisation de SIG et de l'équation universelle de pertes en sol nous a permis d'intégrer les différents facteurs pour aboutir à une délimitation des zones susceptibles à une dynamique érosive intense et de calculer les pertes en sols générées dans différents sous bassins du bassin versant. L'érosion hydrique est évaluée pour le bassin versant de l'oued Amtar à 2500 t/ha/an, près de 46.8 % de la surface de bassin présente une perte en terre, comprise entre 0 et 50 t/ha /an, ce qui représente un taux considéré comme moyen à faible.

Selon la spatialisation de ces estimations de perte en terre, ces zones à faible potentiel d'érosion correspondent principalement aux terres de cultures caractérisées par une topographie dominée par des classes de pentes faible et une érosivité des pluies peu agressives. Près de 49.31 % de la superficie du bassin versant présente des taux d'érosion importants qui sont compris entre 50 et 500t/ha/an. Ces zones sont localisées, principalement, sur de fortes et longues pentes mais avec une agressivité de pluie moyenne. Cependant 3.89 % du bassin connaît une très forte érosion avec une perte en terre compris entre 500 et 2500 t/ha/an ; ce sont les zones montagneuses avec une très forte agressivité de pluie et de forte et très longue pente.

Les résultats obtenus dans cette étude offrent une aide pertinente aux responsables, décideurs et aux aménagistes (différents acteurs) pour mettre en œuvre des stratégies et plans d'actions pour planifier les interventions antiérosives (conservation des sols), surtout dans les zones les plus vulnérable au risque d'érosion hydrique. Ils permettent aussi de suivre l'impact de l'utilisation des sols et des aménagements.

Conclusion du chapitre V

L'évaluation quantitative du risque de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'oued Amtar, montre une grande fragilité de ce bassin. Les sols et les formations superficielles issus de terrains essentiellement marneux ont une grande susceptibilité à l'érosion hydrique. Ceci est d'autant plus important que les terrains ont été quasi totalement dénudés et mis en culture. L'énorme perte en terres enregistrée, annuellement, montre une imbrication des facteurs d'ordre naturel et anthropique.

L'utilisation de SIG et de l'équation universelle de pertes en sol nous a permis d'intégrer les différents facteurs pour aboutir à une délimitation des zones susceptibles à une dynamique érosive intense et de calculer les pertes en sols générées dans différents sous bassins du bassin versant. L'érosion hydrique est évaluée pour le bassin versant de l'oued Amtar à 2500 t/ha/an, près de 46.8 % de la surface de bassin présente une perte en terre, comprise entre 0 et 50 t/ha /an, ce qui représente un taux considéré comme moyen à faible.

Selon la spatialisation de ces estimations de perte en terre, ces zones à faible potentiel d'érosion correspondent principalement aux terres de cultures caractérisées par une topographie dominée par des classes de pentes faible et une érosivité des pluies peu agressives. Près de 49.31 % de la superficie du bassin versant présente des taux d'érosion importants qui sont compris entre 50 et 500t/ha/an. Ces zones sont localisées, principalement, sur de fortes et longues pentes mais avec une agressivité de pluie moyenne. Cependant 3.89 % du bassin connaît une très forte érosion avec une perte en terre compris entre 500 et 2500 t/ha/an ; ce sont les zones montagneuses avec une très forte agressivité de pluie et de forte et très longue pente.

Après l'établissement du modèle final de l'approche RUSLE, les zones prioritaires du risque d'érosion hydrique sont identifiées dans cette carte, mais les valeurs des pertes en sol quantifiées sont exagérées un peu, pour les classes élevées et très élevées à cause des pentes raides dans cette zone montagneuse et qui dépassent souvent les limites des paramètres de pente du modèle RUSLE (plus de 1000 m), et qui réduisant la précision dans ces contextes spécifiques.

Cette étude était une expérience visant à vérifier l'inefficacité de l'application du modèle RUSLE dans les zones montagneuses situées à plus de 1 000 mètres d'altitude.

CHAPITRES VI : CARTOGRAPHIE DE LA SUSCEPTIBILITE AUX GLISSEMENTS DANS LE BASSIN VERSANT DE L'OUED AMTAR A L'AIDE DES MODELES DE MACHINE LEARNING

Résumé du chapitre VI

Résumé

La gestion efficace des risques liés aux bassins versants et aux glissements de terrain nécessite une cartographie complète de la susceptibilité aux glissements de terrain. Des modèles d'apprentissage automatique, notamment les machines à vecteurs de support (SVM) et les forêts aléatoires (RF), ont été utilisés pour cartographier la susceptibilité aux glissements de terrain dans le bassin versant de l'oued Amtar. Des cartes d'inventaire détaillées des glissements de terrain ont été générées à partir de photographies aériennes, de recherches sur le terrain et de rapports d'études géotechniques. Une analyse de corrélation des facteurs a permis d'éliminer soigneusement les facteurs redondants parmi les quatorze facteurs déclencheurs de glissements de terrain.

Ainsi, 30 % des sites ont été choisis au hasard pour les tests, tandis que 70 % des sites de glissements de terrain ont été utilisés pour l'entraînement du modèle. Le modèle RF a atteint une aire sous la courbe (AUC) de 94,7 %, classant 30,07 % de la région comme ayant une faible susceptibilité, tandis que le modèle SVM a obtenu une AUC de 80,65 %, indiquant une haute sensibilité dans 53,5 % des emplacements. Ces résultats fournissent des informations cruciales aux autorités locales, soutenant des stratégies de planification et de développement efficaces pour le bassin versant.

Mots-clés : Susceptibilité aux glissements de terrain, Modèles d'apprentissage automatique, Analyse de corrélation des facteurs, Aire sous la courbe (AUC) ; Oued Amtar, Maroc.

VI.1. Introduction

Les mouvements de terrain ont toujours été attrayant, tant du point de vue théorique que pratique, et ont attiré l'attention des chercheurs en géosciences du monde entier : géologues, géomorphologue, ingénieurs, développeurs de modèles, et autres professionnels. Les mouvements de terrain représentent l'un des risques géologiques les plus destructeurs ; ils peuvent présenter des déplacements et des vitesses remarquables, susceptibles d'anéantir des communautés et des établissements humains. Ils sont de plus en plus fréquents de nos jours en raison des conditions climatiques extrêmes et de l'intervention de l'homme dans la nature.

L'interaction de l'action anthropique avec le milieu physique et les développements rapides perturbent l'équilibre géomorphologique augmentant ainsi l'occurrence des mouvements de terrain. Même les surfaces à pentes faibles sont parfois sujettes aux mouvements de terrain qui peuvent briser les infrastructures, perturber la circulation et arrêter le trafic. La difficulté économique induite par les mouvements de terrain impacte les conditions socio-économiques des sociétés humaines.

Au Maroc, les montagnes sont les zones les plus sujettes à ce phénomène vue ses conditions et caractéristiques morpho-géo-climatiques. Pour étudier ce phénomène, la compréhension de la dynamique des mouvements de terrain est indispensable, ainsi que leur surveillance et leur prévision. Viendront par la suite l'atténuation du danger, les techniques de modélisation numérique et l'analyse de quelques études de cas sélectionnées.

Dans la présente étude, les mouvements de terrain dans le bassin versant de l'oued Amtar (Rif central) seront analysés selon trois approches définies par l'échelle du bassin versant.

La zone d'étude correspond au bassin versant de l'oued Amtar entre Oued Laou à l'Est et Jebha à l'Ouest, la côte de la Méditerranée au nord et la chaîne montagneuse de Bab Bered au sud. Elle intersecte, les communes de Amtar, Bni Smih, Iounane, Bni Bousera, (province de Chefchaouen) (*Figure 53*).

Dans cette étude, nous avons opté pour l'utilisation de modèles d'apprentissage automatique (Machine Learning). Ces modèles constituent un classificateur indépendant de la distribution géostatistique des facteurs de glissements de terrain. Cette approche est basée sur l'apprentissage à partir des données réelles de terrain. Les modèles d'apprentissage automatique sont des systèmes capables d'acquérir, de représenter et de calculer une cartographie à partir d'un espace multi-dimensionnel. Ils permettent de passer d'un espace de données complexe (facteurs de glissements) à un ensemble de données représentant une cartographie des zones à risque.

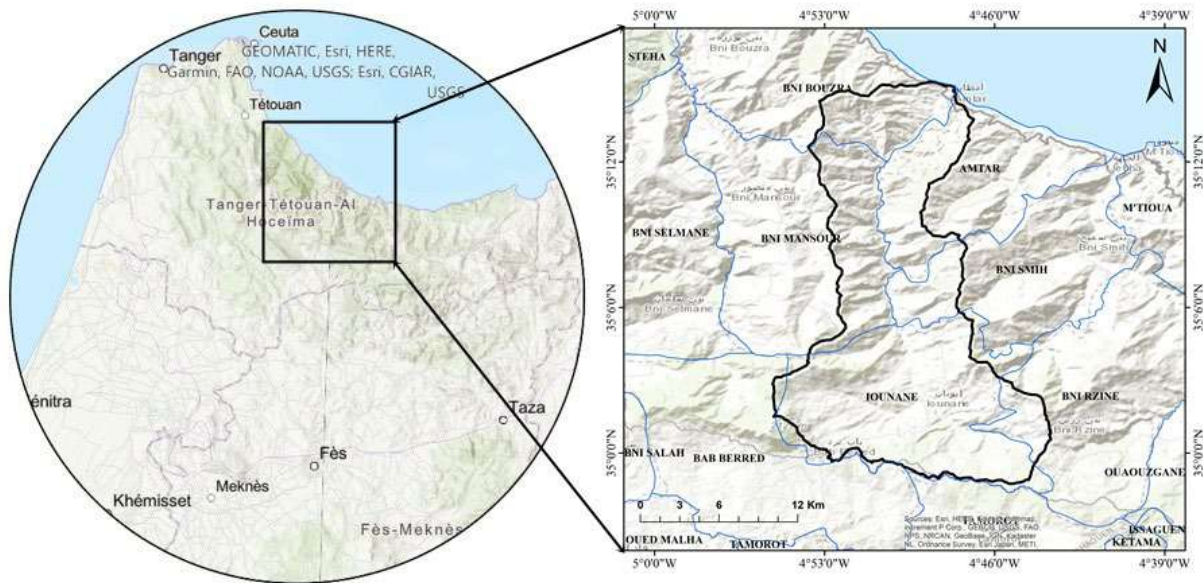


Figure 53 : Situation de la zone d'étude (Bassin versant de l'oued Amtar)

Cette méthode offre l'avantage de s'affranchir des contraintes liées à la distribution géostatistique des variables. Elle permet une modélisation plus flexible et adaptative du phénomène des glissements de terrain, en se basant directement sur l'apprentissage des données de terrain observées.

VI.2. Méthodologie

Cette étude s'appuie sur une base de données spatiale détaillée pour cartographier la susceptibilité aux glissements de terrain. Cette base de données compile différentes sources d'informations, telles que les observations de terrain, les photographies aériennes, les données de télédétection, ainsi que des facteurs topographiques, géologiques et liés aux activités humaines.

Dans un premier temps, les données sont organisées et structurées. L'ensemble est divisé en un jeu d'entraînement (70%) et un jeu de test (30%). Un processus de jointure spatiale permet ensuite de construire un jeu de données unifié.

L'étape suivante consiste en l'application de trois modèles d'apprentissage automatique : la machine à vecteurs de support (SVM), la forêt aléatoire (Random Forest) et la régression logistique (LR). Ces modèles sont entraînés sur le jeu de données d'entraînement afin d'apprendre à prédire la susceptibilité aux glissements de terrain.

La performance des modèles est ensuite évaluée sur le jeu de données de test, à l'aide de métriques telles que la courbe ROC, l'AUC, la courbe PRC et l'AUC. Le modèle présentant les meilleures performances est alors sélectionné pour produire les cartes finales de susceptibilité aux glissements de terrain (*Figure 54*)

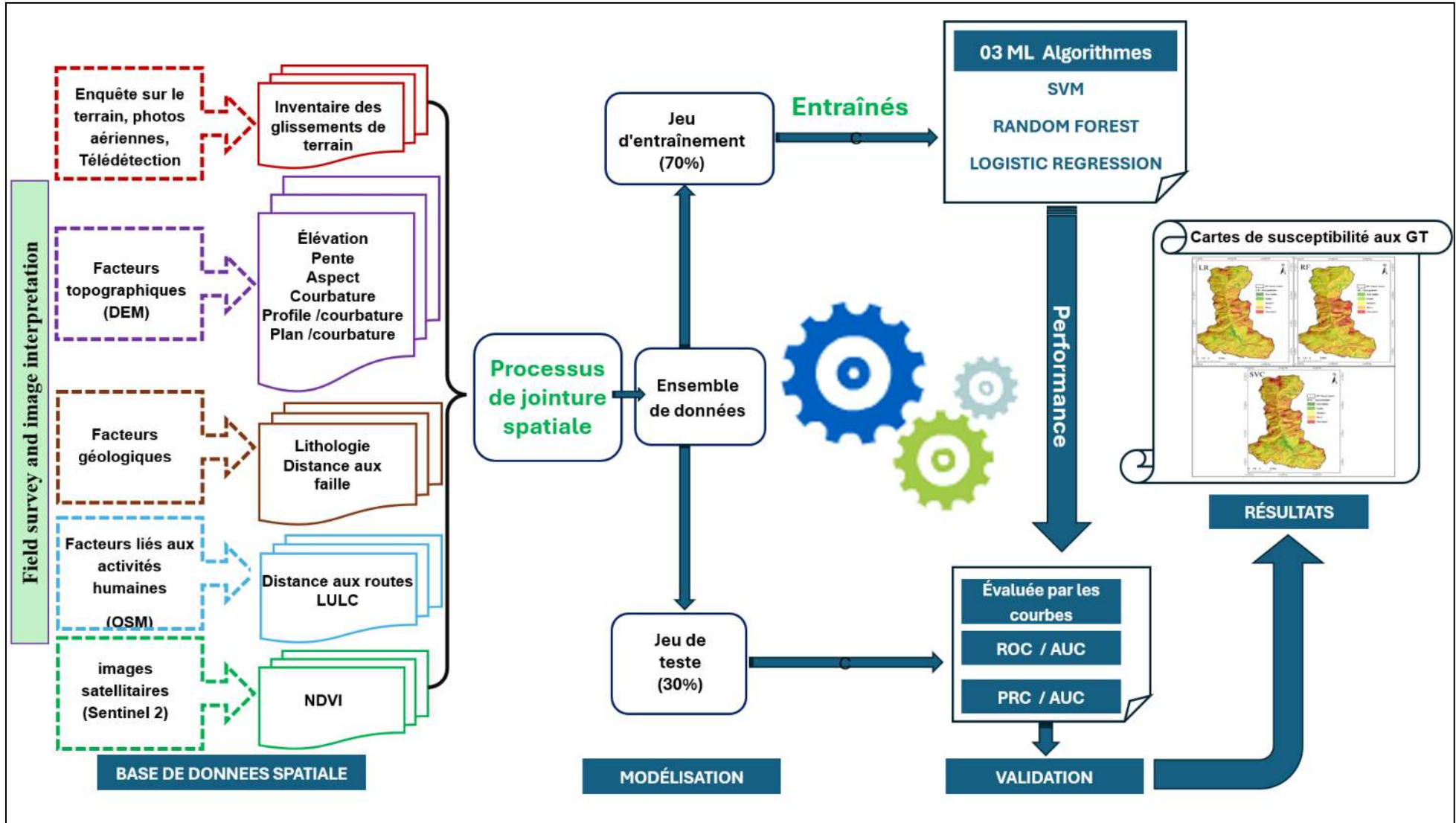


Figure 54 : Méthodologie de cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain par apprentissage automatique

VI.3. Modèles d'application

VI.3.1. Modèle RF (Random Forest)

Le modèle Random Forest, ou forêt aléatoire, est une méthode d'apprentissage automatique très performante et robuste pour prédire la susceptibilité aux glissements de terrain. Il s'agit d'un ensemble d'arbres de décision construits de manière aléatoire, chacun étant entraîné sur un sous-ensemble aléatoire des données d'apprentissage (Liu et al., 2021 ; Benzougagh et al., 2024).

Cette approche par ensemble permet d'obtenir une grande diversité au sein de la forêt, ce qui améliore la robustesse du modèle final. Pour classer une nouvelle observation, le modèle Random Forest effectue un vote majoritaire parmi les prédictions de tous les arbres, réduisant ainsi les biais et la variance du modèle (Youssef et al., 2016 ; Xu et al., 2023).

Un avantage important du Random Forest est qu'il peut fournir une mesure de l'importance relative de chaque variable d'entrée (facteurs topographiques, géologiques, etc.) dans la prédiction de la susceptibilité aux glissements. Cela aide les utilisateurs à identifier les facteurs les plus pertinents pour ce type d'application (Ho, 1995 & 1998 ; Breiman, 2001).

$$H(X) = \text{av}_k \max \sum_{i=1}^k I(h_i(X) = Y)$$

Avec : $\bar{a}$ indique la moyenne, et la fonction indicatrice est notée I . v_k

Le modèle RF présente de nombreux avantages, tels que : (i) la détermination des corrélations entre les variables sans générer d'hypothèses centrales (Darminto et Chu, 2019) ; (ii) être un meilleur programme d'apprentissage automatique pour évaluer les situations hiérarchiques dans le big data (Darminto et Chu, 2019) ; (iii) classer les variables indépendantes en fonction de leur importance (Youssef et al., 2015) ; (iv) Cette approche a également l'avantage d'éliminer méticuleusement le problème du surajustement des données en (i) construisant plusieurs arbres, (ii) amorçant les observations et (iii) divisant les nœuds en divisions optimales au sein d'un sous-ensemble aléatoire (Merghadi et al.2020).

De plus, le modèle Random Forest est particulièrement adapté pour traiter des bases de données complexes et hétérogènes, comme c'est souvent le cas dans le domaine de la cartographie des glissements de terrain. Il est également relativement robuste à la présence de valeurs manquantes dans les données d'entrée, ce qui constitue un avantage supplémentaire.

VI.3.2. Modèle SVM (Support Vector Classifier)

Le modèle SVM (Support Vector Classifier) est une méthode d'apprentissage supervisé très performante pour la classification binaire, telle que la prédiction de la susceptibilité aux glissements de terrain (présence/absence). Le principe du SVM est de trouver l'hyperplan optimal qui sépare au mieux les deux classes (zones stables et zones instables) dans l'espace des caractéristiques (Vapnik et Cortes, 1995).

La limite de décision non linéaire a été expliquée par une fonction de noyau K (Vapnik et Cortes, 1995).

$$K(\vec{x_i}, \vec{x_j}) = \Phi(\vec{x_i})^T \Phi(\vec{x_j})$$

La méthode des Machines à Vecteurs de Support (SVM) est une technique d'apprentissage automatique puissante pour résoudre des problèmes de classification non linéaires. La clé de cette méthode réside dans l'utilisation de la fonction Φ qui permet de mapper le vecteur d'apprentissage (x_i) dans un espace de grande dimension.

Pour traiter les problèmes non linéaires, trois fonctions de noyau sont régulièrement utilisées : fonction de noyau linéaire, fonction de noyau de base radiale et fonction de noyau polynomial

$$K(\vec{x_i}, \vec{x_j}) = \vec{x_i}^T * \vec{x_j}$$

$$K(\vec{x_i}, \vec{x_j}) = \exp\{-\delta^2 \|\vec{x_i} - \vec{x_j}\|^2\}$$

$$K(\vec{x_i}, \vec{x_j}) = (\gamma X_i^T + r)^d$$

Avec :

- γ est le paramètre de la fonction de noyau de base radiale,
- d est le degré du polynôme pour la fonction de noyau polynomial

Les principaux avantages du modèle SVM pour la cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain sont : (i) Capacité de généralisation : le modèle SVM a une bonne capacité à généraliser à de nouvelles données, grâce à la maximisation de la marge entre les deux classes. (ii) Traitement des données non linéaires : grâce à l'utilisation de fonctions noyaux, le SVM peut gérer des problèmes de classification non linéaires, ce qui est souvent le cas pour les facteurs de glissement de terrain. (iii) Robustesse au bruit et aux données aberrantes : le SVM est relativement robuste à la présence de bruit et de données aberrantes dans les jeux de données d'entraînement. (iv) Interprétabilité des résultats : il est possible d'analyser l'importance relative des variables d'entrée (facteurs topographiques, géologiques, etc...) en utilisant des méthodes telles que l'analyse des coefficients du modèle (Cristianini et al., 2002 ; Benzougagh et al., 2023).

VI.3.3. Modèle LR (Logistic Regresion)

Le modèle de régression logistique (LR) est également connu sous le nom d'analyse multivariée est l'un des modèles statistiques les plus utilisés en cartographie. Le modèle de régression logistique (LR) est une méthode d'apprentissage supervisé très utilisée pour la classification binaire, comme la prédiction de la susceptibilité aux glissements de terrain (présence/absence). Contrairement au modèle SVM qui cherche à trouver l'hyperplan optimal séparant les deux classes, le LR modélise directement la probabilité d'appartenance à l'une des classes en fonction des variables explicatives.

Il est mesuré avec des variables dichotomiques telles que 1 ou 0 (présence ou absence), et il est déterminé par une ou plusieurs variables indépendantes (Menard, 2002). Il clarifie la relation entre une variable catégorielle et certains facteurs dépendants, qui peuvent être des variables catégorielles, continues ou binaires (Dou et al., 2018). L'avantage de l'algorithme est que les variables ne nécessitent pas une distribution normale (Pradhan et al., 2010 ; Bammou et al., 2024). Les variables indépendantes dans le LR peuvent être désignées par 0 et 1, indiquant l'absence ou la présence d'un risque. La sortie du modèle varie entre 0 et 1 et représente la susceptibilité aux risques.

Cette approche permet de modéliser la relation entre les différents facteurs de prédisposition et de déclenchement des glissements de terrain et la probabilité d'occurrence de ces phénomènes, selon les équations suivantes.

$$P=1/(1+\exp-z)$$

Avec :

- P : est la probabilité d'occurrence d'un glissement de terrain dont les valeurs estimées varient de 0 à 1.
- Z : est un facteur causal de glissement de terrain et est supposée être une combinaison linéaire des facteurs causaux X_i ($i = 1, 2, \dots, n$) selon l'équation suivante :

$$Z=e-(\beta_0+\beta_1x_1+\beta_2x_2+\beta_3x_3+..... \beta_ix_i)$$

Avec :

- β_i : est le coefficient de régression optimal reflétant les contributions de chaque facteur ;
- β_0 : est le coefficient constant ; x_i est les facteurs de conditionnement d'entrée ;
- P : est la probabilité d'occurrence des glissements de terrain.

VI.4. Relation des systèmes d'information géographique (SIG) avec les modèles d'application

Les systèmes d'information géographique (SIG) jouent un rôle central dans la préparation et l'analyse des données géospatiales nécessaires à la modélisation de la susceptibilité aux glissements de terrain. Ils permettent d'acquérir et de stocker les différentes couches d'information pertinentes, comme les données topographiques, géologiques, d'occupation des sols, etc... Ces données sont ensuite prétraitées et organisées au sein d'un environnement SIG, en veillant à leur cohérence et à leur qualité.

Les SIG offrent également des outils puissants d'analyse spatiale qui permettent de dériver de nouvelles variables explicatives à partir des données de base. Par exemple, ils peuvent calculer la pente, la courbure, l'indice topographique ou d'autres attributs topographiques qui s'avèrent souvent déterminants pour la prédiction des glissements de terrain. Cette étape de préparation des données dans le SIG est cruciale pour alimenter efficacement les modèles d'application.

Enfin, une fois que les modèles RF, LR ou SVM ont été appliqués et ont produit des cartes de susceptibilité, le SIG permet de les visualiser et de les cartographier de manière interactive. Cela facilite l'interprétation des résultats et leur utilisation dans des processus décisionnels.

Afin d'élaborer les modèles d'analyse des glissements de terrain, une base de données géospatiale a été constituée sur un système d'information géographique (SIG). Cette base de données comprend plusieurs couches d'informations pertinentes. Tout d'abord, elle contient un inventaire détaillé de la répartition spatiale des différents types de glissements de terrain (*Figure 55*). Ces données ont été identifiées et vérifiées à partir d'images satellitaires Google Earth, ainsi que numérisées à partir des cartes géologiques à l'échelle 1/50 000 et validées par des missions de terrain.

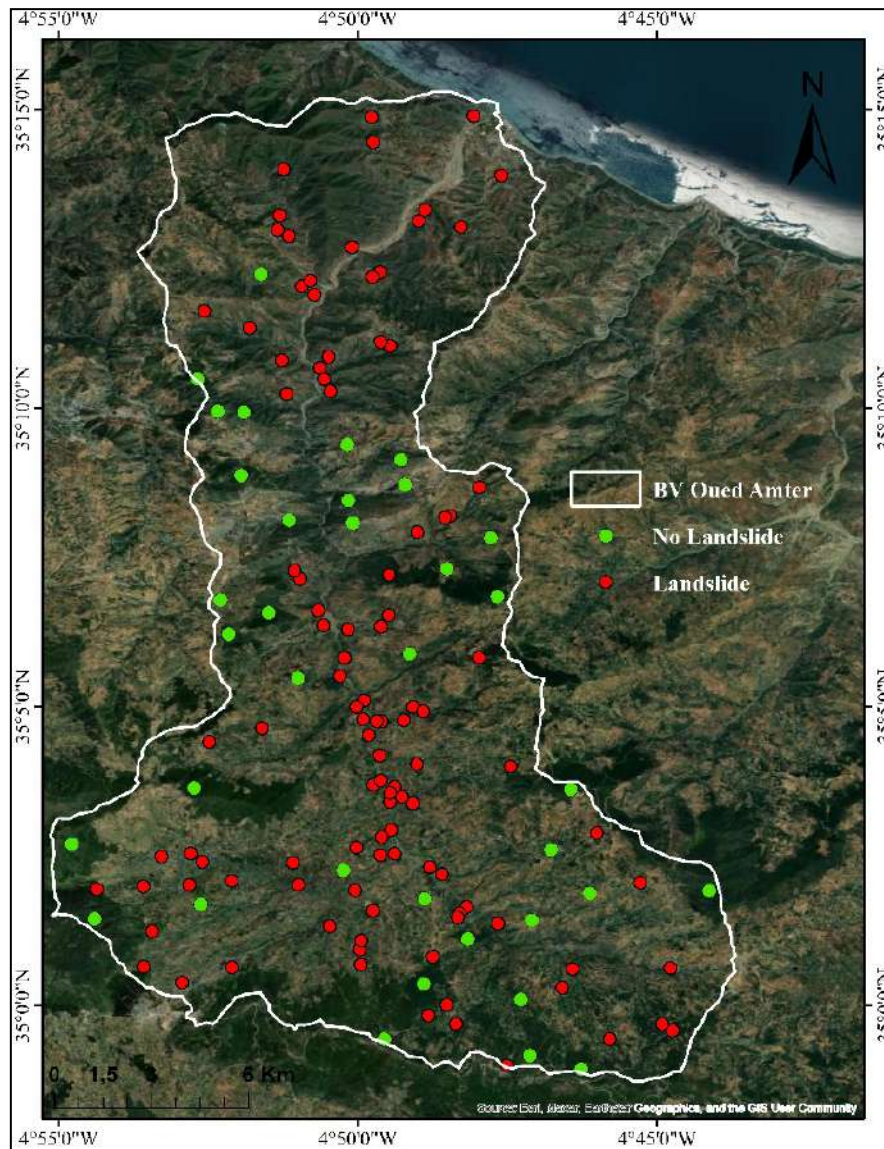


Figure 55 : Carte de l'inventaire des mouvements de terrain, au niveau du bassin versant de l'oued Amtar

VI.5. Intégration des modèles d'application

Les modèles RF, LR et SVM sont soit implémentés directement au sein de l'environnement SIG, soit interfacés avec celui-ci. Cela permet d'exploiter les données géospatiales préparées dans le SIG comme entrées pour l'entraînement et la calibration de ces modèles prédictifs.

Par exemple, le modèle RF peut utiliser les différentes couches d'information du SIG (topographie, géologie, occupation des sols, etc.) comme variables explicatives pour prédire la susceptibilité aux glissements de terrain. De même, le modèle LR s'appuie sur ces mêmes données géospatiales pour estimer les probabilités d'occurrence des glissements.

L'intégration étroite entre les SIG et les modèles d'application permet ainsi de tirer parti des forces de chacun : les SIG fournissent les données et les outils d'analyse spatiale, tandis que les modèles exploitent ces informations pour produire des cartes de susceptibilité plus précises et fiables.

VI.5.1. Complémentarité des approches

Les SIG et les modèles RF, LR et SVM sont complémentaires et leur utilisation conjointe offre une approche holistique pour la cartographie et la gestion des risques de glissements de terrain. Les SIG apportent le cadre spatio-temporel et les données nécessaires, tandis que les modèles d'apprentissage automatique permettent d'exploiter au mieux les capacités d'analyse spatiale des SIG pour produire des résultats plus performants.

La synergie entre les systèmes d'information géographique (SIG) et les modèles d'application est essentielle pour une évaluation fine et fiable de la susceptibilité aux glissements de terrain. Cette approche géospatiale intégrée offre une vision holistique des processus en jeu, en croisant diverses couches d'informations. Elle permet d'identifier les paramètres environnementaux clés pour la compréhension et la modélisation des phénomènes de glissements de terrain. Cette base de données solide constitue un fondement essentiel pour l'élaboration de modèles prédictifs performants.

À leur tour, ces modèles jouent un rôle crucial dans le développement de stratégies efficaces de gestion des risques de glissements de terrain, favorisant ainsi une meilleure prévention et gestion de ce type de risque naturel.

En parallèle, le SIG intègre de nombreux paramètres environnementaux essentiels à l'analyse. Cela inclut des données sur la topographie (modèle numérique de terrain, pente, orientation des versants, etc...), la géologie (lithologie, failles, contacts géologiques, etc...), l'hydrologie (réseau hydrographique, zones humides, nappes phréatiques, etc.), l'occupation des sols (forêts, zones agricoles, zones urbanisées, etc.) et la climatologie (précipitations, température, évapotranspiration, etc.). Le SIG permet également d'intégrer d'autres informations pertinentes, comme les infrastructures (routes, bâtiments, réseaux, etc.) et les données socio-économiques (zones habitées, activités économiques, etc...).

VI.5.2. Facteurs de prédisposition et de déclenchement des glissements de terrain

Afin d'élaborer la carte de susceptibilité aux glissements de terrain pour ce bassin versant, plusieurs facteurs de prédisposition et de déclenchement ont été pris en compte ([Zhou et al., 2018](#)). Environ une vingtaine de facteurs ont été dérivés à partir de diverses sources de données. (i) Préparation et traitement des données : avant de pouvoir exploiter ces facteurs, un important travail de préparation

et de traitement des données a été nécessaire. Tout d'abord, les cartes ont été géoréférencées afin de les positionner correctement dans l'espace géographique. Ensuite, les données satellitaires ont été téléchargées depuis différentes sources. Enfin, les données ont été enregistrées sous forme de couches Raster, permettant une correspondance, une superposition et une juxtaposition spatiale des pixels entre les différentes couches. (ii) Homogénéisation et mise à l'échelle : une fois les données collectées, elles ont été homogénéisées et mises à l'échelle pour correspondre à une même résolution spatiale sur l'ensemble de la zone d'étude. Cette étape a permis d'assurer la cohérence et la comparabilité des différents facteurs utilisés dans l'analyse.

Les facteurs pris en compte pour l'élaboration de la carte de susceptibilité incluent notamment : Facteurs topographiques (pente, orientation, courbure, etc...) ; facteurs géologiques (lithologie, failles, fractures, etc...) ; facteurs hydrologiques (réseau hydrographique, zones humides, nappes phréatiques, etc...) ; facteurs d'occupation du sol (forêts, zones agricoles, zones urbanisées, etc...) ; facteurs climatiques (précipitations, température, etc.) et facteurs anthropiques (infrastructures, activités économiques, etc.), (Sachdeva et coll., 2020).

VI.5.3. Inclinaison de la pente

Les glissements de terrain se produisent plus fréquemment sur les pentes à flanc de colline présentant une inclinaison plus marquée (Youssef et al., 2021). Selon Magliulo et al. (2008), la pente a une influence directe sur la teneur en eau du sol et l'écoulement souterrain, deux facteurs déterminants dans la fréquence des phénomènes de glissements de terrain. Plus spécifiquement, les pentes raides favorisent une saturation plus rapide des sols, en raison d'un drainage plus difficile. Cela se traduit par une augmentation de la pression interstitielle dans le sol, diminuant ainsi sa résistance au cisaillement. Cette fragilité accrue des pentes pentues est un élément clé dans la compréhension de la susceptibilité aux glissements de terrain.

Ainsi, l'inclinaison de la pente apparaît comme un paramètre géomorphologique essentiel à prendre en compte dans l'évaluation et la modélisation de ce type de risque naturel. Une analyse précise de la topographie locale est donc primordiale pour identifier les zones les plus susceptibles aux glissements de terrain.

VI.5.4. Indice de végétation par différence normalisée

Le NDVI est reconnu comme une variable importante dans la modélisation de la susceptibilité aux glissements de terrain (Sidle et al., 2006 ; Althuwaynee et al., 2012). En effet, la végétation joue un rôle essentiel dans la stabilité des pentes, en améliorant la cohésion et la résistance au cisaillement du

sol grâce à son système racinaire. De plus, la végétation permet de retenir de grandes quantités d'eau, influençant ainsi les conditions hydrologiques locales.

Pour déterminer la valeur du NDVI dans la région d'étude, l'équation suivante a été appliquée à l'aide d'images satellite du 18 juillet 2019 :

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{R}) / (\text{NIR} + \text{R})$$

Avec :

- NIR représente la réflectance dans le proche infrarouge
- R représente la réflectance dans le rouge

Cette analyse du NDVI permet d'identifier les zones présentant une végétation dense et saine, qui contribuent à la stabilité des pentes. Ces informations sont essentielles dans l'évaluation de la susceptibilité aux glissements de terrain à l'échelle locale.

VI.5.5. Élévation

Il s'agit d'une caractéristique topographique qui influe sur l'instabilité des pentes. Presque toutes les évaluations de la susceptibilité aux glissements de terrain l'utilisent souvent (Feizizadeh et al., 2014)

VI.5.6. Occupation du sol (LULC)

Dans la région d'étude, les glissements de terrain sont principalement causés par les activités humaines, notamment le développement des infrastructures et l'urbanisation (Xiao et al., 2019 ; Sestras et al., 2021). En effet, la construction de routes et de bâtiments peut altérer de manière significative la stabilité des pentes et les conditions géologiques d'origine.

Les modèles précédents ont intégré des données sur l'utilisation et la couverture des terres (LULC) afin d'évaluer la vulnérabilité aux catastrophes naturelles, y compris les glissements de terrain (Choubin et al., 2019 ; Hysa et al., 2021 ; Debnath et al., 2023). L'analyse de ces données LULC permet de mieux comprendre comment les activités humaines modifient l'environnement et influencent la fréquence et l'ampleur des phénomènes de glissements de terrain. Par exemple, la conversion de zones boisées en zones urbanisées ou infrastructurées peut réduire la cohésion du sol et augmenter le risque de déstabilisation des pentes.

De même, les coupes de végétation, les terrassements et les modifications du drainage naturel sont autant de facteurs aggravants qui doivent être pris en compte dans l'évaluation de la susceptibilité aux glissements de terrain. Ainsi, l'intégration des données LULC dans les modèles d'évaluation de la susceptibilité aux glissements de terrain est essentielle pour mieux cerner les causes anthropiques de ce risque naturel et mettre en place des mesures de prévention et de gestion adaptées.

Évaluation des risques d'érosion de surface et profonde à oued Amtar (Rif, Maroc)

Apport des outils géomatiques et de machine Learning

VI.5.7. Distance aux failles

Les déformations tectoniques, telles que les failles et les cisaillements, peuvent constituer des zones de faiblesse dans la roche et être à l'origine de glissements de terrain ([Lee et al., 2002](#) ; [Kanungo et al., 2006](#) ; [Bucci et al., 2016](#)). En effet, ces zones de faille se caractérisent par une baisse de la résistance mécanique des matériaux, les rendant plus susceptibles à la rupture et au mouvement. Outre les failles, les plis ductiles peuvent également contribuer à fragiliser la structure du sous-sol et augmenter les risques de glissements de terrain. Ces zones de déformation tectonique, qu'elles soient fragiles ou ductiles, peuvent donc servir d'indicateurs de la susceptibilité aux glissements de terrain.

L'analyse de la distance aux failles et aux autres structures géologiques déformées constitue donc une variable importante à prendre en compte dans les modèles d'évaluation de la susceptibilité aux glissements de terrain. Plus un site est proche d'une zone de faille ou de déformation, plus il sera considéré comme vulnérable aux mouvements de terrain.

De ce fait, l'intégration de cette information géologique dans les modèles permet d'identifier les secteurs les plus fragiles et de mieux cibler les zones nécessitant des mesures de surveillance et de prévention des glissements de terrain.

VI.5.8. Distance aux rivières

Le ruissellement des cours d'eau joue un rôle important dans la déstabilisation des pentes et le déclenchement des glissements de terrain ([Hadjji et al., 2013](#)). En effet, l'écoulement des eaux de surface peut contribuer à l'érosion de la base des versants, qui augmente la pression de l'eau interstitielle à proximité. Cette augmentation de la pression de l'eau dans les pores du sol fragilise la stabilité des pentes et favorise les mouvements de terrain. Ainsi, la distance aux cours d'eau est une variable essentielle à prendre en compte dans l'évaluation de la susceptibilité aux glissements de terrain ([Pradhan et al., 2010](#) ; [Pradhan et al., 2011](#)). Plus un site est proche d'une rivière ou d'un ruisseau, plus il sera considéré comme vulnérable aux phénomènes d'érosion de berge et de sous-cotation, et donc aux glissements de terrain.

L'intégration de cette information sur la distance aux rivières dans les modèles d'évaluation de la susceptibilité permet donc d'identifier les zones les plus à risque et de mieux cibler les secteurs nécessitant des mesures de protection contre les mouvements de terrain. Cette variable hydrologique est complémentaire des autres facteurs géologiques et anthropiques pour une analyse complète du risque de glissement de terrain.

VI.5.9. Courbure de plan et de profil

La courbure du terrain est une variable géomorphométrique essentielle utilisée dans de nombreuses études sur les processus de surface (Romstad et al., 2012). On distingue deux types de courbure : (i) la courbure de plan (ou courbure horizontale) : Elle décrit la convergence ou la divergence du ruissellement de surface. Une courbure de plan concave favorise la concentration des écoulements, tandis qu'une courbure convexe tend à disperser les eaux de ruissellement (Xiao et al., 2019). (ii) la courbure de profil (ou courbure verticale) : Elle contrôle l'accélération ou la décélération des matériaux le long de la pente. Une courbure de profil concave accentue la vitesse d'écoulement et l'érosion, tandis qu'une courbure convexe ralentit les mouvements de matériaux et favorise leur dépôt (Prasicek et al., 2014).

Ainsi, la courbure de plan influence directement la convergence et la dispersion du ruissellement de surface, tandis que la courbure de profil contrôle l'accélération et la décélération des mouvements de matériaux le long de la pente, affectant ainsi leur dépôt. Ces deux types de courbure jouent un rôle important dans les processus géomorphologiques, notamment en ce qui concerne les glissements de terrain. L'intégration de ces variables topographiques dans les modèles d'évaluation de la susceptibilité aux glissements de terrain permet de mieux comprendre et prendre en compte les processus géomorphologiques qui contrôlent la stabilité des versants.

VI.5.10. Indice de position topographique TPI

L'indice de position topographique (Topographic Position Index, TPI) est une variable géomorphométrique qui permet d'identifier les positions relatives d'un élément de terrain par rapport à son environnement local (Chendes et al., 2008 ; Sadkaoui et al., 2024). Le TPI est calculé comme la différence entre l'altitude d'une cellule et la moyenne des altitudes de ses cellules voisines dans une fenêtre d'analyse de taille prédéfinie.

Une valeur de TPI positive indique que la cellule se trouve sur une position plus élevée que son entourage (crête, sommet), tandis qu'une valeur négative signifie que la cellule est dans une position plus basse (vallon, dépression). Une valeur de TPI proche de zéro correspond à des zones de pente moyenne, ni en position de haut ni de bas.

L'utilisation du TPI permet donc de caractériser la microtopographie d'un terrain et d'identifier les principaux éléments du relief (sommets, pentes, fonds de vallée, etc.). Cette information topographique détaillée est particulièrement utile pour l'analyse des processus géomorphologiques, la cartographie des unités de terrain ou encore la modélisation de la distribution spatiale de certains phénomènes naturels.

VI.5.11. Indice d'humidité topographique TWI :

L'indice d'humidité topographique (Topographic Wetness Index, TWI) est un indicateur géomorphométrique qui permet d'estimer l'accumulation potentielle de l'eau de surface dans un terrain (Chendes et al., 2008 ; Sadkaoui et al., 2024). Le TWI se calcule à partir de la pente locale et de l'aire drainée amont, reflétant ainsi l'influence de la topographie sur les processus hydrologiques.

Une valeur élevée de TWI indique des zones de faible pente et/ou de forte accumulation des écoulements, où l'humidité du sol tend à être plus importante. Inversement, les zones de forte pente et de faible accumulation des eaux de ruissellement présentent des valeurs de TWI plus faibles.

Cet indice permet donc de caractériser la distribution spatiale de l'humidité du sol en fonction de la topographie. Il est particulièrement utile pour l'étude des processus hydrologiques, la cartographie des zones humides, la modélisation des risques d'inondation ou encore l'évaluation de la sensibilité des sols à l'érosion hydrique dans les régions à fort relief.

VI.5.12. Aspect de la pente

L'aspect de la pente, qui décrit l'orientation de la pente par rapport aux points cardinaux, est une variable topographique importante dans l'étude des processus géomorphologiques et des risques naturels. L'orientation des pentes peut affecter les glissements de terrain à la fois directement et indirectement, à travers divers mécanismes (Neuhaeuser et al., 2012 ; Quan et Lee, 2012) : (i) l'orientation des discontinuités géologiques (failles, joints, stratifications) qui influencent la stabilité des versants. (ii) les régimes de vent et de précipitations, qui peuvent être modifiés par l'orientation des pentes. (iii) la concentration de l'humidité du sol, l'évapotranspiration et le développement racinaire de la végétation, qui dépendent de l'exposition aux rayonnements solaires. (iv) les processus hydrologiques, comme le ruissellement et l'infiltration, qui sont influencés par l'orientation des pentes. (v) la répartition de la végétation, qui s'adapte différemment selon l'exposition des versants.

La prise en compte de l'aspect de la pente est donc essentielle pour comprendre et modéliser les processus géomorphologiques, en particulier dans le cadre de l'évaluation de la susceptibilité aux glissements de terrain.

VI.5.13. Distance aux routes

La construction de routes est une activité humaine importante qui peut modifier de manière significative la morphologie des pentes naturelles (Xiao et al., 2019). Cela a des répercussions sur la distance des versants par rapport aux routes, paramètre qui s'avère déterminant dans l'évaluation de la probabilité de glissements de terrain.

En effet, la proximité des pentes aux routes peut influencer les processus de déstabilisation des versants de plusieurs façons (Wang et al., 2016 ; Xiao et al., 2019) : (i) les déblais et remblais liés à la construction routière modifient la géométrie des pentes et peuvent générer des zones de surcharge ou de concentration des eaux de ruissellement. (ii) les vibrations induites par le trafic routier peuvent fragiliser la stabilité des versants, en particulier lorsque les routes sont situées en haut ou au milieu des pentes. (iii) la proximité des routes facilite l'accès et favorise le développement d'activités anthropiques (déforestation, surexploitation, etc.) pouvant accroître les risques de glissements.

Ainsi, la distance aux routes est une variable topographique importante à prendre en compte dans l'analyse de la susceptibilité aux mouvements de terrain, aux côtés d'autres paramètres comme la pente, la courbure ou l'humidité du sol.

VI.5.14. Lithologie

La lithologie, qui décrit la nature des roches et des dépôts géologiques, est un facteur déterminant dans l'étude des glissements de terrain. En effet, les propriétés mécaniques et physiques des différentes unités lithologiques influencent grandement les types de mouvements de terrain susceptibles de se produire (Sun et al., 2022 ; Henriques et al., 2015).

Certaines caractéristiques lithologiques jouent un rôle crucial : (i) le type de roche (sédimentaire, magmatique, métamorphique) et son degré de résistance aux intempéries conditionnent la stabilité des versants. (ii) la densité, la durabilité et la perméabilité des formations géologiques affectent leur comportement hydromécanique et leur sensibilité aux processus de dégradation. (iii) la présence de plans de faiblesse comme des failles, des joints ou des surfaces de stratification facilite la rupture le long de ces discontinuités.

Ainsi, la cartographie et l'analyse détaillée de la lithologie locale sont essentielles pour identifier les zones les plus propices aux différents types de glissements de terrain (glissements translationnels, rotationnels, effondrements, etc.). Cette information géologique constitue un élément clé dans l'évaluation de la susceptibilité aux mouvements de terrain.

VI.6. Résultats

La zone d'étude est connue pour ses grandes instabilités gravitationnelles. Or, il s'est avéré que cette zone est sensible aux grands glissements de terrain mais aussi à des phénomènes de moindre ampleur que ce que représentent les différents documents cartographiques. Ceci montre que la méthode basée sur les modèles de Machine Learning est robuste et donne des résultats.

VI.6.1. Facteurs contribuant aux glissements de terrain

VI.6.1.1. Inclinaison de la pente (Slope)

L'inclinaison de la pente est l'un des facteurs topographiques les plus importants pour prédire la susceptibilité aux glissements de terrain. Plus l'inclinaison de la pente est importante, plus la force de gravité agissant sur les matériaux du versant est élevée, ce qui augmente la probabilité de déstabilisation et de glissement.

Les pentes raides ont généralement des sols plus minces et une couverture végétale plus clairsemée, réduisant la cohésion et le renforcement racinaire qui contribuent à la stabilité des versants. Sur des pentes fortes, les processus hydrologiques comme le ruissellement et l'infiltration sont accélérés, pouvant saturer les sols et diminuer leur résistance au cisaillement.

Les activités humaines comme la construction et l'exploitation des terres sont souvent concentrées sur les pentes plus douces, tandis que les pentes raides sont plus susceptibles aux glissements naturels.

Les modèles de machine Learning intègrent généralement l'inclinaison de la pente comme l'un des principaux prédicteurs dans l'évaluation de la susceptibilité aux glissements de terrain. Son influence est souvent non linéaire et peut être captée par des fonctions de transformation appropriées dans les algorithmes d'apprentissage automatique.

La carte de pente (*Figure 56-A*) a été dérivée d'un modèle numérique d'élévation (MNE), avec une résolution spatiale de la carte de pente est de 30 mètres relativement fins et devrait permettre de bien capturer la variabilité spatiale de la topographie. Les valeurs de pente varient de 0 à 59 degrés. Elles semblent assez étendues, couvrant à la fois des pentes douces et des pentes très raides.

Il sera important d'analyser la distribution des valeurs de pente dans la zone d'étude et d'évaluer comment cette variable topographique se comporte dans les modèles de prédiction des glissements de terrain.

VI.6.1.2. Elévation

L'élévation est une variable topographique essentielle à prendre en compte dans l'analyse de la susceptibilité aux glissements de terrain. En général, les zones de haute altitude présentent une plus forte probabilité de glissements, car elles sont souvent caractérisées par des pentes plus raides, des sols plus minces et une végétation plus clairsemée. Cependant, l'effet de l'élévation n'est pas toujours linéaire, et certaines zones de moyenne altitude peuvent également être propices aux glissements, en fonction d'autres facteurs comme la géologie ou l'occupation des sols.

Dans les modèles de Machine Learning, l'élévation est souvent intégrée sous forme de variable continue ou après transformation (par exemple, en utilisant des classes d'élévation) afin de capturer au mieux sa relation non linéaire avec la susceptibilité aux glissements. L'analyse de la distribution spatiale de l'élévation dans la zone d'étude et de sa corrélation avec les zones de glissements historiques peut aider à comprendre son influence spécifique dans ce contexte. (*Figure 56-B*)

La carte d'élévation a été réalisée à partir du modèle numérique d'élévation (MNE) de la zone d'étude. L'élévation varie de 0 à 2100 mètres au-dessus du niveau de la mer.

Les valeurs de NDVI, quant à elles, s'échelonnent de 0,02 à 0,84 dans la région étudiée. Les valeurs les plus élevées, proches de 1, indiquent une végétation verte et dense, tandis que les valeurs les plus basses, proches de 0, correspondent à une absence ou à une très faible végétation.

L'élévation est un facteur topographique important qui peut influencer la stabilité des pentes et la susceptibilité aux glissements de terrain. De même, le NDVI, en tant qu'indicateur de la couverture végétale, joue également un rôle dans la stabilisation des versants.

L'analyse conjointe de ces deux variables spatiales (élévation et NDVI) pourrait donc apporter des informations pertinentes sur les facteurs de prédisposition aux glissements de terrain dans cette zone d'étude. Ces données semblent fournir une bonne caractérisation du contexte physique, ce qui sera très utile pour la modélisation de la susceptibilité aux glissements de terrain (*Figure 56-C*)

VI.6.1.3. Occupation du sol (LULC)

L'occupation du sol (Land Use/Land Cover - LULC) est une variable clé qui influence la stabilité des pentes et la susceptibilité aux glissements de terrain. Les différents types d'occupation du sol (forêts, cultures, zones urbanisées, etc.) ont des impacts contrastés sur la cohésion et la perméabilité des sols, ainsi que sur la protection offerte contre l'érosion. Par exemple, les zones boisées ont généralement une plus grande stabilité grâce aux systèmes racinaires qui renforcent la cohésion du sol. À l'inverse, les zones urbanisées ou les terres agricoles peuvent présenter une plus grande fragilité face aux glissements de terrain, en fonction des pratiques de gestion des sols.

Dans les modèles de Machine Learning, la variable LULC est souvent intégrée sous forme de couches cartographiques (cartes d'occupation du sol) ou de classes d'occupation du sol. Cela permet d'évaluer l'influence spécifique de chaque type d'occupation du sol sur la susceptibilité aux glissements, en interaction avec d'autres facteurs tels que la pente, la géologie ou les précipitations. L'analyse de la distribution spatiale de l'occupation du sol et de sa corrélation avec les zones de glissements historiques est donc une étape importante pour comprendre son rôle dans le contexte de l'étude. L'intégration de

cette variable dans les modèles prédictifs de glissements de terrain peut ainsi améliorer significativement leur performance.

La carte d'utilisation des terres a été dérivée de l'ensemble de données "Sentinel-2 10-Meter Land Use/Land-Cover". Six types distincts d'utilisation des terres ont été identifiés dans la région d'étude : Arbres, Eau, Cultures, Terres cultivées, Sol nu et Prairies. Cette classification détaillée de l'occupation du sol (LULC) est très pertinente pour l'analyse de la susceptibilité aux glissements de terrain. En effet, chaque type d'utilisation des terres aura un impact différent sur la stabilité des pentes, en fonction des caractéristiques du couvert végétal, de l'imperméabilité des sols, etc.

L'inclusion de cette carte (*Figure 56-D*) d'utilisation des terres dans les modèles de machine Learning permettra probablement d'améliorer la précision de la cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain, en identifiant les zones les plus vulnérables en fonction des différents types d'occupation du sol.

L'analyse de la répartition spatiale de ces classes d'utilisation des terres et de leur lien avec la localisation des glissements de terrain historiques sera également un élément clé pour comprendre le rôle de ce facteur dans la dynamique des mouvements de terrain.

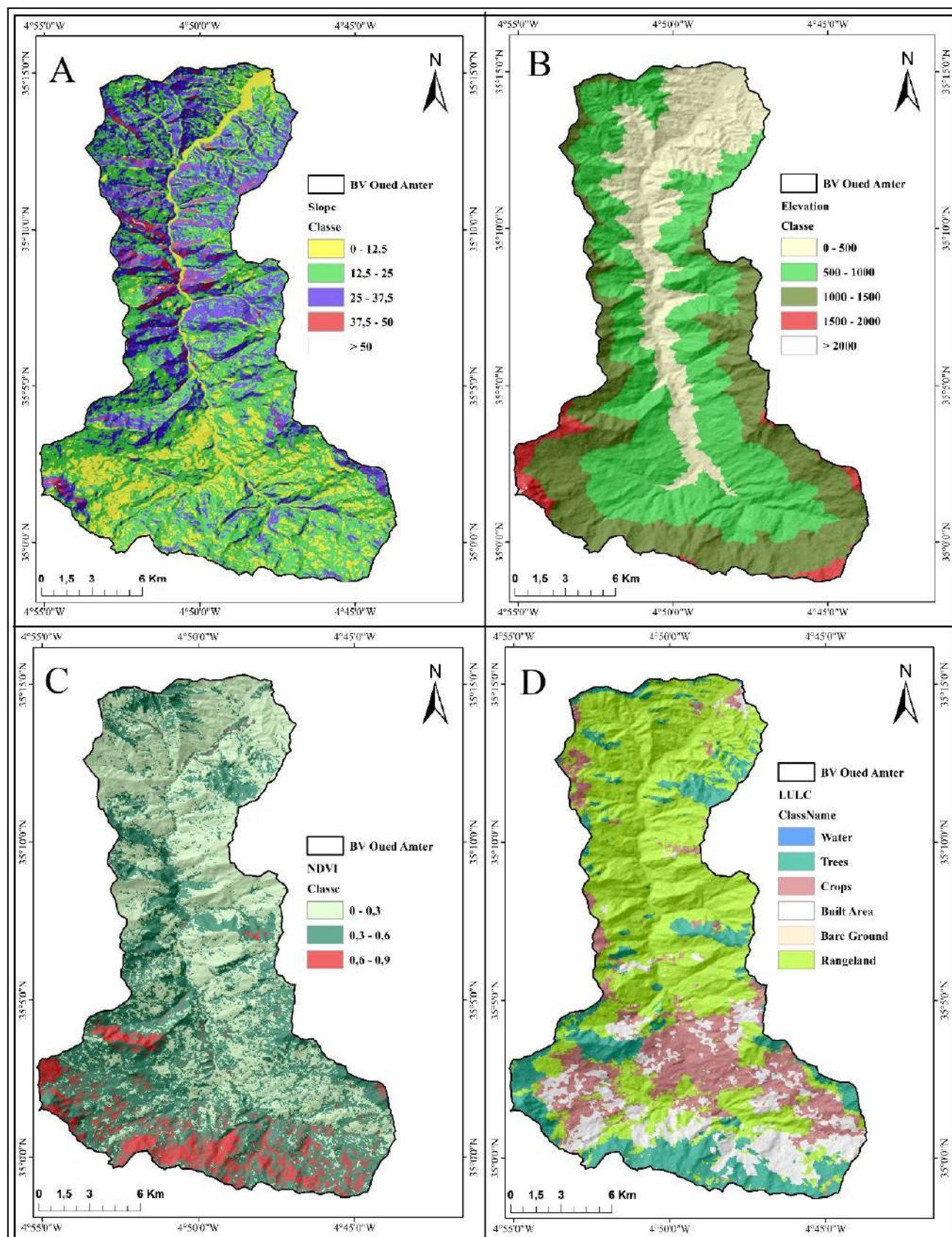


Figure 56 : Cartes des facteurs influençant l'occurrence des glissements de terrain : La pente (A), l'élévation (B), NDVI (C), LULC (D)

VI.6.1.4. Aspect

L'aspect, qui correspond à l'orientation des pentes, a une influence significative sur la stabilité des versants et la susceptibilité aux glissements de terrain. Cela s'explique principalement par les différences d'ensoleillement et d'humidité du sol induites par l'orientation. Par exemple, les pentes exposées au sud ou à l'ouest reçoivent généralement plus d'ensoleillement, ce qui peut entraîner un assèchement plus rapide des sols et une moindre cohésion. À l'inverse, les pentes exposées au nord ou à l'est restent plus humides, ce qui peut favoriser la saturation des sols et ainsi augmenter les risques de glissements.

Dans les modèles de Machine Learning appliqués à la cartographie des risques, l'aspect est souvent intégré sous forme de couches cartographiques indiquant l'orientation des pentes (nord, sud, est, ouest, etc.). Cela permet d'évaluer l'influence spécifique de chaque orientation sur la susceptibilité aux mouvements de terrain, en interaction avec d'autres facteurs tels que la pente, la géologie ou l'occupation du sol.

L'aspect de la pente, c'est-à-dire son orientation, a été identifié comme un facteur influençant de manière significative la distribution des types de glissements superficiels dans la zone d'étude. Cependant, l'aspect n'a pas semblé avoir le même impact sur les autres types de glissements de terrain. Pour déterminer l'aspect des pentes, les chercheurs ont utilisé un modèle numérique d'élévation (MNE) et ont classé les orientations en 9 catégories distinctes : Plat (-1), Nord (0-22,5 ; 337,5-360), Nord-est (22,5-67,5), Est (67,5-112,5), Sud-est (112,5-157,5), Sud (157,5-202,5), Sud-ouest (202,5-247,5), Ouest (247,5-292,5) et Nord-ouest (292,5-337,5).

Cette analyse détaillée de l'aspect a permis de mettre en évidence son rôle essentiel dans la répartition spatiale des glissements superficiels, probablement en raison de l'influence de l'exposition sur les processus de saturation et de stabilité des sols. En revanche, pour les autres types de glissements de terrain, d'autres facteurs semblent avoir joué un rôle plus prépondérant que l'aspect dans leur distribution géographique.

Cette compréhension différenciée de l'influence de l'aspect selon le type de glissement est très intéressante et permettra sans doute d'affiner les modèles prédictifs en intégrant de manière plus pertinente cette variable topographique. L'analyse de la distribution spatiale de l'aspect et de sa corrélation avec les zones de glissements historiques est donc importante pour comprendre son rôle dans le contexte de l'étude. L'intégration de cette variable dans les modèles prédictifs de glissements de terrain peut ainsi contribuer à améliorer la performance de la cartographie des risques (*Figure 57-E*).

VI.6.1.5. Courbure (Curvature)

La courbure du terrain est l'un des facteurs topographiques clés pour la modélisation et la cartographie du risque de glissements de terrain. Elle est souvent utilisée comme variable prédictive dans les approches de Machine Learning pour identifier les zones susceptibles aux mouvements de masse dans le bassin versant de l'oued Amtar. La courbure permet de caractériser la forme convexe ou concave du terrain à différentes échelles. Cette information est importante car elle reflète des conditions hydrologiques et de stabilité des pentes différentes : (i) les zones concaves (courbure négative) tendent à accumuler l'eau et les sédiments, ce qui peut fragiliser la stabilité des pentes. (ii) les zones convexes (courbure positive) sont généralement plus stables, avec un meilleur drainage naturel. (iii) les ruptures de pente (courbure proche de 0) sont aussi des zones à surveiller, car elles peuvent concentrer les écoulements et les contraintes.

L'intégration de la courbure du terrain, sous forme de couches d'information dérivées d'un modèle numérique de terrain, permet donc aux modèles d'apprentissage automatique de mieux identifier les zones morphologiquement plus susceptibles aux glissements. Dans notre zone d'étude, la courbure du profil, avec des valeurs allant de -4,08 à 4,19, reflète l'accélération ou la décélération des écoulements le long de la pente. Les zones convexes (courbure positive) tendent à favoriser un écoulement ralenti, tandis que les zones concaves (courbure négative) concentrent un écoulement accéléré.

La courbure du plan, perpendiculaire à la direction de la plus forte pente, indique les zones de convergence ou divergence des écoulements sur la surface (*Figure 57-F*).

L'intégration de ces variables de courbure, a d'autres variables comme la pente, l'occupation du sol, la géologie ou l'hydrologie, permet d'affiner significativement les modèles prédictifs du risque de glissements de terrain à différentes échelles d'analyse.

VI.6.1.6. Distance aux failles (Distance to fault)

Dans le cadre de la cartographie du risque de glissements de terrain par les modèles d'apprentissage automatique dans le bassin versant de l'oued Amtar, la distance aux failles (distance to fault) est un facteur contributif important à prendre en compte.

Contexte géologique local : Identifier les principales failles actives présentes dans le bassin versant de l'oued Amtar et leur niveau d'activité. Évaluer la lithologie et la fracturation des formations géologiques en fonction de la proximité aux failles.

Intégration de la variable "distance aux failles" : Générer une couche d'information spatiale indiquant la distance de chaque point du bassin à la faille la plus proche. Analyser la corrélation entre cette

distance et l'occurrence des glissements de terrain répertoriés dans la zone d'étude. Identifier des seuils de distance critiques au-delà desquels le risque de glissement diminue significativement.

Combinaison avec d'autres facteurs prédictifs : Croiser la distance aux failles avec d'autres variables telles que la pente, la lithologie, l'occupation du sol, l'hydrologie, etc. Évaluer les interactions entre la proximité aux failles et ces autres facteurs pour affiner la prédiction du risque.

Validation et ajustement du modèle : Tester l'importance relative de la distance aux failles par rapport aux autres variables dans les modèles d'apprentissage automatique. Ajuster les seuils de distance en fonction des résultats de validation du modèle sur des données de glissements de terrain observées.

Considérations à l'échelle du bassin versant : Cartographier les zones à risque élevé en fonction de la proximité aux failles, en complément d'autres facteurs de prédisposition. Hiérarchiser les secteurs à étudier plus finement en fonction de cette variable géologique.

À l'aide d'un logiciel SIG et de l'outil de Distance euclidienne, une carte de la distance aux failles a été générée (**Figure 57-G**). Les cartes géologiques à l'échelle 1 :25 000 de la zone d'étude ont permis d'identifier les failles utilisées dans cette analyse. La distance aux failles varie de 0 mètre à plus de 3000 mètres dans le bassin versant de l'oued Amtar.

VI.6.1.7. Distance par rapport aux routes (Distance to road)

La distance par rapport aux routes (Distance to road) est un autre facteur pertinent à prendre en compte dans la cartographie du risque de glissements de terrain dans le bassin versant de l'oued Amtar. Dans cette étude, quelques éléments à considérer dans l'intégration de cette variable dans les modèles de machine Learning : (i) Analyse de la distribution spatiale de la distance aux routes : Créer une carte de la distance aux routes en utilisant les données SIG disponibles sur le réseau routier de la zone d'étude. Examiner la répartition spatiale des valeurs de distance, du minimum (0 m, pour les routes) jusqu'à la distance maximale observée. Identifier les zones les plus proches et les plus éloignées des routes, qui peuvent influencer différemment le risque de glissement. (ii) Corrélation avec l'occurrence des glissements de terrain : Croiser la carte de distance aux routes avec les données sur les glissements de terrain répertoriés. Analyser la répartition des glissements en fonction de classes de distance aux routes (par exemple, 0-50 m, 50-100 m, 100-500 m, 500-1000 m, etc.). Rechercher des seuils de distance critique où le risque de glissement semble plus élevé. (iii) Intégration dans les modèles de prédiction : Inclure la variable "distance aux routes" dans les modèles d'apprentissage automatique (régression logistique, forêts aléatoires, etc.). Évaluer l'importance relative de cette variable dans la prédiction du risque de glissement, en la comparant à d'autres facteurs comme la pente, la lithologie, la distance aux failles, etc... Tester différentes discrétisations de la distance aux routes pour déterminer la meilleure

représentation de ce facteur dans les modèles. Analyser les interactions entre la distance aux routes et les autres variables prédictives. (iv) Validation et cartographie du risque : Évaluer les performances des modèles intégrant la distance aux routes en les testant sur des données de validation indépendantes. Ajuster les seuils de distance aux routes en fonction des résultats de validation pour optimiser la prédiction du risque. Produire des cartes de risque final en combinant la distance aux routes avec les autres facteurs clés, en mettant l'accent sur les zones les plus vulnérables.

L'endommagement ou la suppression des routes peut être un indicateur précoce de l'imminence de glissements de terrain dans le secteur. Dans la présente étude, la plage de distances aux routes a été calculée à l'aide de l'outil de distance euclidienne du logiciel SIG, révélant des valeurs comprises entre 0 et 2513,3 mètres (*Figure 57-H*).

Cette approche permettra de mieux comprendre le rôle de la distance aux routes comme indicateur potentiel de l'instabilité des pentes dans le bassin versant de l'oued Amtar, et d'affiner la cartographie du risque de glissements de terrain en conséquence.

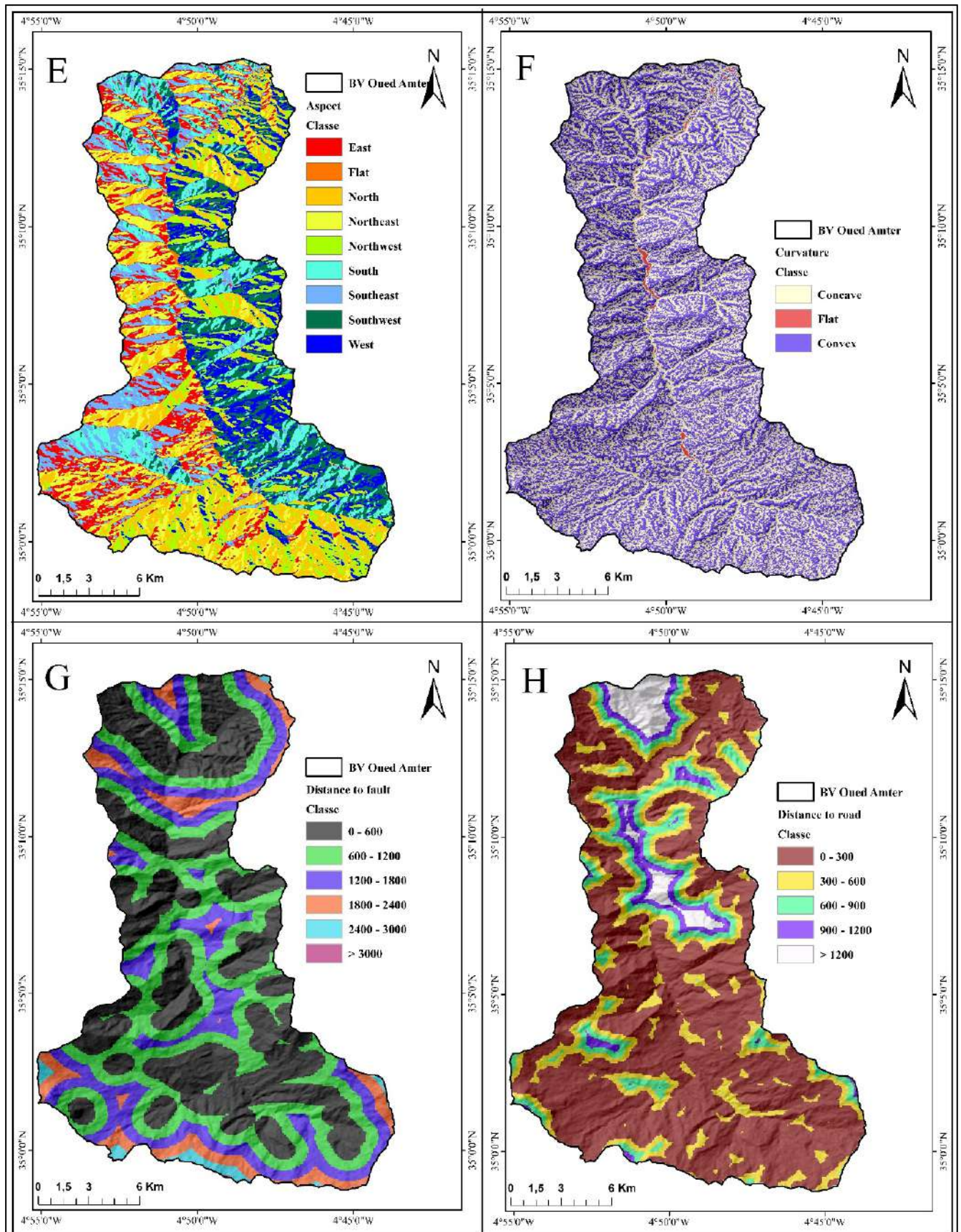


Figure 57 : Cartes du facteur de conditionnement des glissements de terrain : Aspect (E), Curvature (F), Distance aux faille (G), Distance aux routes (H)

VI.6.1.8. Distance aux cours d'eau (Distance to stream)

La distance aux cours d'eau est également un facteur important à prendre en compte dans la cartographie du risque de glissements de terrain par apprentissage automatique (machine Learning) dans le bassin versant de l'oued Amtar. Il faut prendre en considération quelques éléments complémentaires sur l'intérêt d'intégrer cette variable dans les modèles.

(i) Proximité des cours d'eau : Les zones situées à proximité immédiate des cours d'eau sont généralement plus susceptibles aux glissements de terrain, en raison de l'érosion des berges, de la saturation des sols, etc... (ii) Dynamique hydrologique : L'analyse de la distance aux cours d'eau permet d'identifier les secteurs potentiellement influencés par les processus hydrologiques (crues, ruissellement, infiltration), qui jouent un rôle majeur dans le déclenchement des instabilités de terrain. (iii) Complémentarité avec la pente : La combinaison de la distance aux cours d'eau et de la pente du terrain offre une vision plus complète des zones à risque, certains glissements pouvant survenir sur des pentes éloignées des rivières mais influencées par la dynamique hydrologique. (iv) Cartographie détaillée du risque : La distance aux cours d'eau devra être intégrée comme variable explicative dans les modèles de prédiction, permettant ainsi de produire une cartographie affinée du risque de glissements à l'échelle du bassin versant.

Pour ce variable dans notre zone d'étude, le réseau hydrographique a été extrait à partir d'un modèle numérique d'élévation (MNE) d'une résolution de 30 mètres. Cette résolution relativement fine a permis de bien représenter les détails du réseau de rivières et de ruisseaux présents dans le bassin versant de l'oued Amtar.

Pour quantifier la proximité des différentes zones par rapport à ce réseau hydrographique, une approche de distance euclidienne a été utilisée dans le logiciel SIG. Cette méthode a permis de calculer la distance à vol d'oiseau de chaque point du territoire par rapport aux cours d'eau. Les distances ainsi obtenues s'échelonnent de 0 mètre, pour les zones directement bordées par une rivière, jusqu'à 1800 mètres pour les secteurs les plus éloignés du réseau hydrographique. Cette plage de valeurs couvre à la fois les zones très proches des cours d'eau, qui sont généralement les plus susceptibles aux glissements de terrain, mais aussi les zones plus distantes qui peuvent néanmoins être influencées par la dynamique hydrologique du bassin versant.

L'intégration de cette variable "distance aux cours d'eau" dans les modèles de prédiction du risque de glissements de terrain par apprentissage automatique sera donc un élément clé pour affiner la cartographie de la vulnérabilité de ce territoire. Elle devra être croisée avec d'autres facteurs physiques

du milieu afin d'identifier précisément les zones les plus exposées aux instabilités de terrain (*Figure 58-I*).

VI.6.1.9. Courbures en plan et en profil (Plan Curvature, Profil curvature)

Les courbures en plan (plan curvature) et en profil (profile curvature) du terrain constituent également des facteurs importants à prendre en compte dans les modèles de prédiction du risque de glissements de terrain par apprentissage automatique (machine Learning) pour ce bassin versant ([Haigh et Rawat, 2012](#)). La courbure en plan indique la convexité ou la concavité du terrain dans le plan horizontal. Les zones concaves (courbure négative) favorisent la concentration du ruissellement et l'accumulation d'eau, ce qui augmente la propension aux glissements de terrain. À l'inverse, les zones convexes (courbure positive) tendent à faciliter l'écoulement de surface et réduisent la saturation des sols, diminuant ainsi la vulnérabilité ([Evans, 1979](#)).

La courbure en profil, quant à elle, renseigne sur la convexité ou la concavité du terrain dans le plan vertical. Les zones concaves en profil (courbure négative) sont sujettes à une plus forte érosion et accumulation d'eau, fragilisant la stabilité des pentes. A contrario, les zones convexes en profil (courbure positive) favorisent le drainage et la stabilité des versants ([Nasiri Aghdam et al., 2016](#)).

L'analyse conjointe des courbures en plan et en profil permet d'identifier les formes de terrain les plus propices aux glissements, à savoir les zones présentant des concavités dans les deux plans. Cependant, certaines formes convexes peuvent également être à risque en raison d'autres facteurs tels que la géologie ou l'occupation du sol ([Xiao et al., 2019](#)).

Dans le présent travail, la courbure en plan (plan curvature) varie entre -2,80 et 3,002, et la courbure en profil (profile curvature) s'étend de -4,08 à 4,19. Les zones avec des courbures en plan fortement négatives (inférieures à -2) indiquent des concavités prononcées favorisant l'accumulation d'eau et le risque de glissements. De même, les secteurs avec des courbures en profil très négatives (inférieures à -4) sont susceptibles d'être sujets à une érosion plus intense et une moindre stabilité des pentes. A l'inverse, les zones avec des courbures positives, en plan comme en profil, sont généralement plus stables et moins propices aux instabilités de terrain (*Figure 57-J et Figure 57-K*).

VI.6.1.10. Indice d'humidité topographique (TWI)

L'indice d'humidité topographique (TWI) met en évidence l'influence combinée de la topographie et de la teneur en humidité du sol sur la probabilité de glissements de terrain.

Dans la zone de recherche, les valeurs de TWI varient de 3,03 à 22,97 (*Figure 57-L*). Les faibles valeurs de TWI (autour de 3) indiquent des zones avec un drainage efficace et une faible tendance à l'accumulation d'eau, donc une moindre prédisposition aux glissements de terrain.

A l'inverse, les fortes valeurs de TWI (autour de 23) correspondent à des zones de faible pente et de forte accumulation d'eau, plus vulnérables aux instabilités de terrain. L'analyse de la répartition spatiale du TWI permet donc d'identifier les secteurs les plus humides et susceptibles de saturation, qui sont généralement plus propices aux glissements de terrain.

Cette variable topographique, intégrée aux modèles de prédiction par apprentissage automatique, contribuera à améliorer la cartographie du risque de glissements dans le bassin versant de l'oued Amtar.

VI.6.1.11. Lithologie

Les variations de la lithologie ont un impact significatif sur différents types de géorisques comme les glissements de terrain et les affaissements. Les caractéristiques physiques et mécaniques des formations géologiques (type, résistance, vieillissement, densité, perméabilité, etc.) influencent leur stabilité ([Rahmati et al., 2016](#) ; [Benzougagh et al., 2020](#)).

La carte géologique à l'échelle 1 :25 000 a été utilisée comme base, et des images Landsat-8 à 30 m de résolution ont permis d'affiner la cartographie des différentes unités lithologiques ([Henriques et coll., 2015](#) ; [Bammou et al., 2024](#)). Cela a permis d'identifier une diversité de formations : roches métamorphiques, graviers, argiles, schistes, quartzites, marnes, grès, calcaires, dolomies, conglomérats, flyschs, grésopélitiques (*Figure 59*).

Cette caractérisation lithologique détaillée est essentielle pour alimenter les modèles prédictifs des différents types de géorisques, comme les glissements de terrain. Les propriétés des formations géologiques doivent être intégrées comme facteurs explicatifs dans ces modèles de machine Learning.

Dans le bassin versant de l'oued Amtar, On observe une grande variété de lithologies, allant des roches métamorphiques aux dépôts sédimentaires (calcaires, grès, marnes, flyschs), en passant par des formations superficielles comme les graviers et argiles. Cette hétérogénéité du sous-sol est un facteur majeur à prendre en compte pour l'analyse de la stabilité des pentes.

Certaines lithologies, comme les argiles, marnes et schistes tendres, sont connues pour être plus propices aux glissements de terrain que les roches plus dures et drainantes (calcaires, grès, quartzites). On remarque que ces formations à faible résistance mécanique et perméabilité sont largement présentes, notamment dans les zones de pentes plus prononcées.

En croisant cette carte lithologique avec une carte de susceptibilité aux glissements de terrain, on peut identifier des liens intéressants. Les zones de forte susceptibilité semblent correspondre aux secteurs dominés par les formations géologiques les plus sensibles (argiles, marnes, schistes), tandis que les zones de faible susceptibilité coïncident davantage avec les affleurements de roches plus résistantes (calcaires, grès, quartzites).

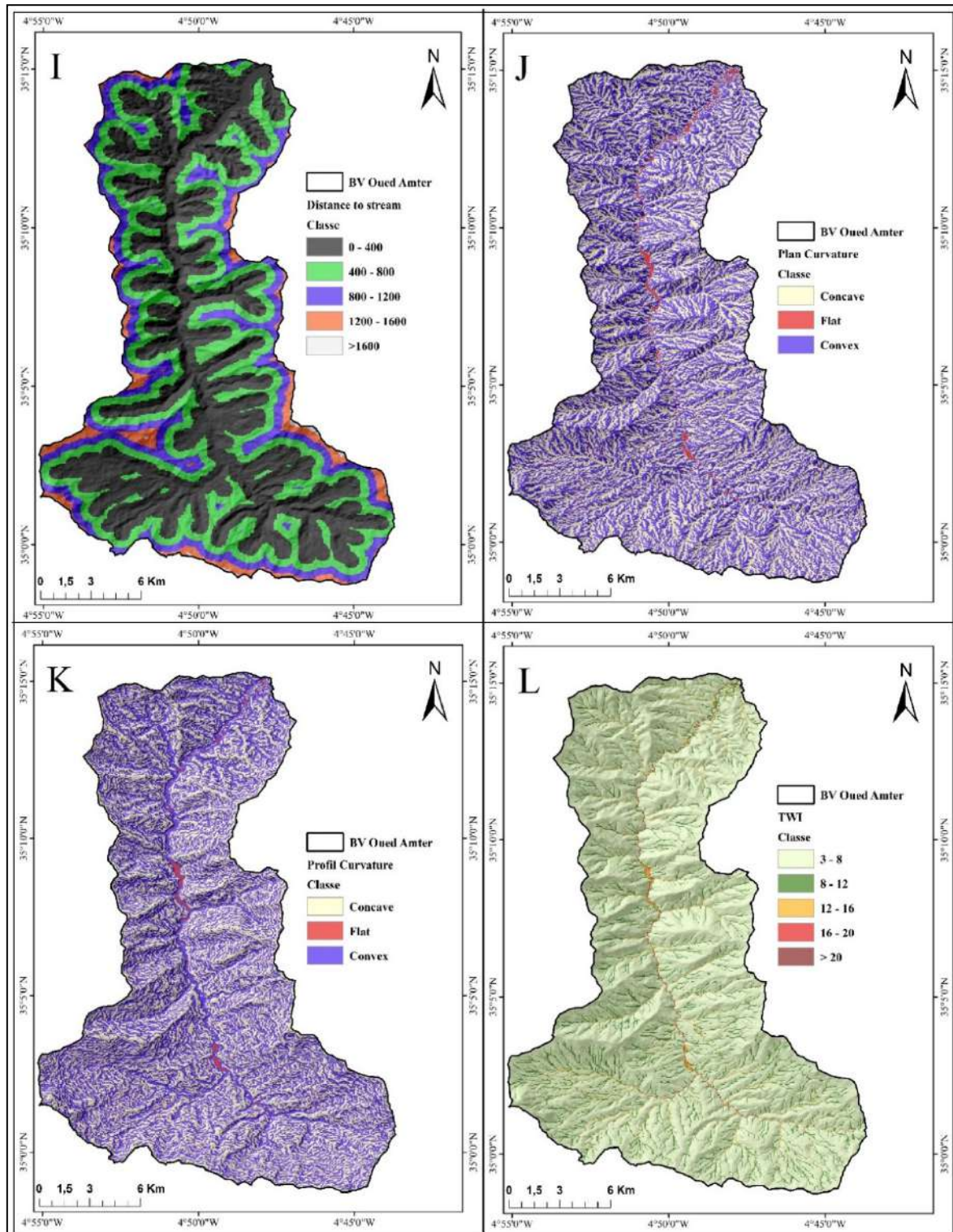


Figure 58 : Cartes du facteur de conditionnement des glissements de terrain : Distance to Stream (I), Plan courbure (J), Profil courbure (K), TWI (L)

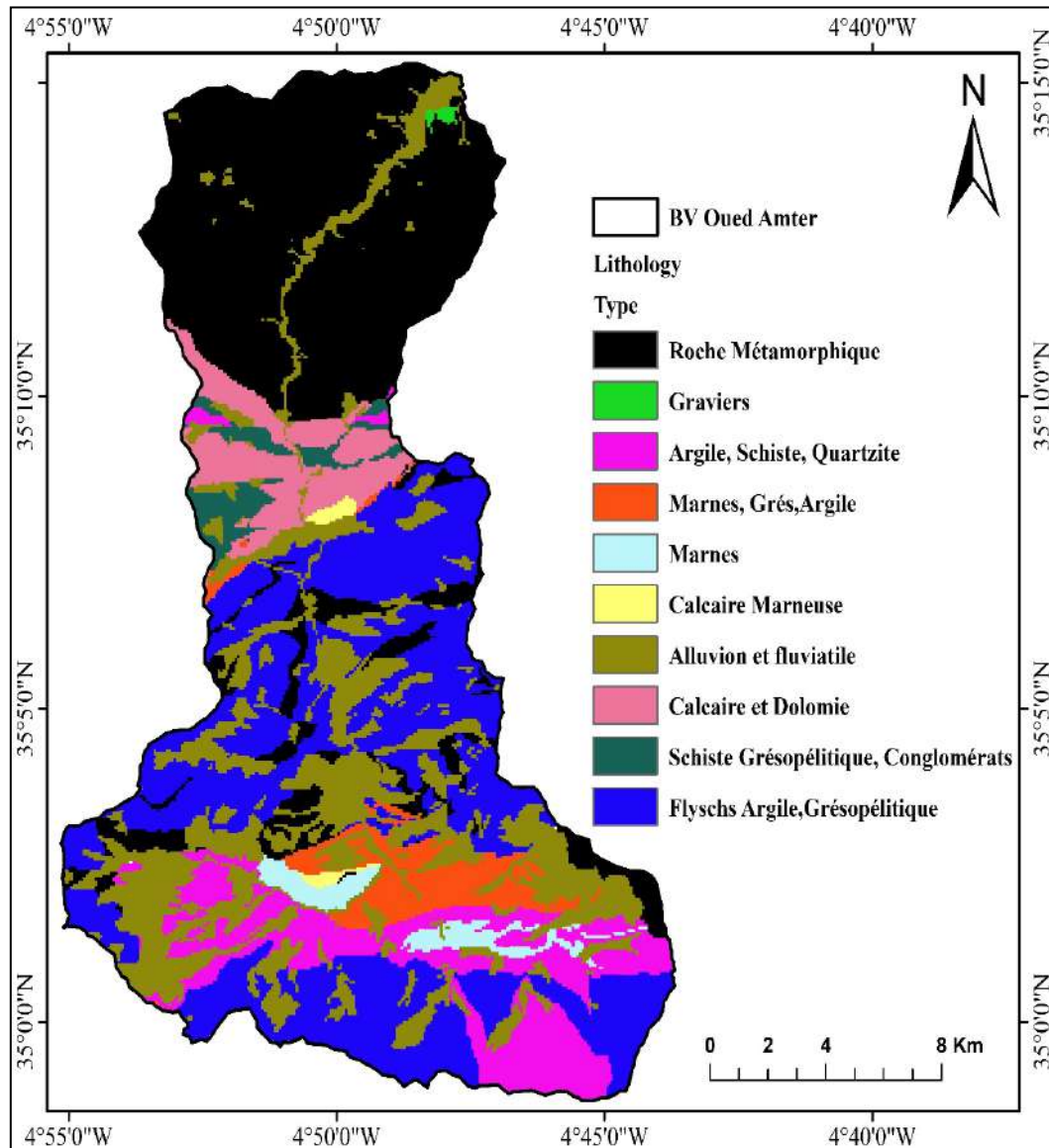


Figure 59 : Carte de lithologie a été construit à partir de la carte géologique de 1 :25000 de la zone d'étude

VI.7. Analyse de multi multicritère

Pour affiner l'évaluation de la susceptibilité au glissement du terrain, il sera nécessaire de croiser les données des différents facteurs tels que la pente, l'hydrologie, l'occupation du sol, lithologie, etc... Une analyse multicritère intégrant les variables permettra d'améliorer la prédiction des zones à risque de glissement du terrain dans le bassin versant de l'oued Amtar.

La détermination de la multicritère des facteurs d'occupation du sol est une étape essentielle dans toute simulation de glissement de terrain utilisant une approche multivariée. Le degré d'interdépendance entre les variables indépendantes peut avoir un impact significatif sur la précision globale du modèle. Une multicritère excessive peut, par exemple, réduire le pouvoir prédictif du modèle, soulignant ainsi la nécessité d'une évaluation rigoureuse pour assurer la stabilité et la fiabilité des résultats de simulation (Arabameri et al., 2020 ; Wang et al., 2023).

Dans le cadre de cette étude, la multicritère des treize composantes des facteurs d'occupation du sol a été testée à l'aide de facteurs d'inflation de la variance (VIF) et de mesures de tolérance. La multicritère est généralement définie comme une tolérance inférieure à 0,2 ou un VIF de cinq ou plus (O'Brien, 2007 ; Tompson et al., 2017 ; Shah et al., 2023).

L'analyse des variables de conditionnement a montré que tous les facteurs de prédisposition aux glissements de terrain utilisés dans le modèle de susceptibilité aux glissements de terrain (LSM) pour cette étude de cas sont fiables et peuvent être appliqués en toute sécurité (*Tableau 27*).

Tableau 27 : Analyse de la multicritère des facteurs d'occupation du sol.

Facteur	VIF	Tolérance
Lithologie	1.171202	0.853824
Aspect	1.204357	0.830319
Distance aux failles	1.213701	0.823926
Distance aux routes	1.250647	0.799586
Pente	1.292941	0.773431
TWI	1.338505	0.747102
NDVI	1.488225	0.671941
LULC	1.618698	0.617781
Plan Courbature	2.062301	0.484895
Distance aux cours d'eau	2.123603	0.470898
Élévation	2.153613	0.464336
Profil Courbature	2.198024	0.454954
Courbure	3.156935	0.316763

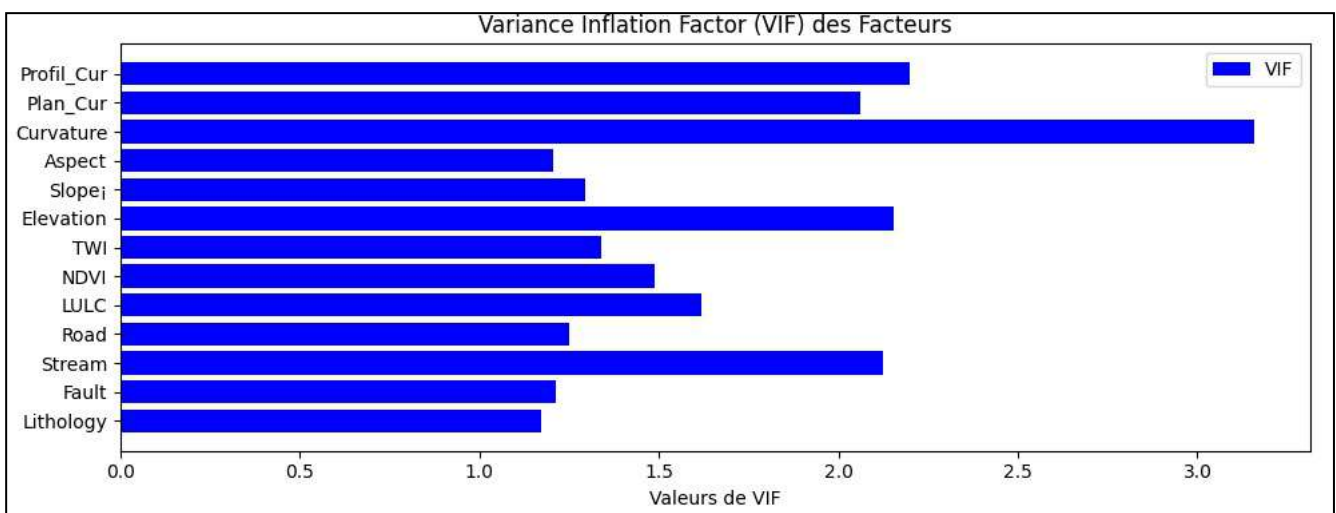
Le tableau présente les valeurs de Facteur d'Inflation de la Variance (VIF) et de Tolérance pour différents facteurs pouvant influencer le risque de glissement de terrain. L'analyse de ces valeurs permet d'évaluer le niveau de multicollinéarité entre les variables. Tout d'abord, on peut identifier un groupe de variables présentant une faible multicollinéarité : Lithologie (VIF=1,171, Tolérance=0,854), Aspect (VIF=1,204, Tolérance=0,830), Distance aux failles (VIF=1,214, Tolérance=0,824), Distance aux

routes (VIF=1,251, Tolérance=0,800), Pente (VIF=1,293, Tolérance=0,773), TWI (Indice Topographique d'Humidité) (VIF=1,339, Tolérance=0,747). Ces variables ont des valeurs de VIF inférieures à 5 et des valeurs de Tolérance supérieures à 0,2, indiquant un faible niveau de multicollinéarité. Elles peuvent donc être incluses dans le modèle sans risque de biais lié à la multicollinéarité.

Ensuite, on peut identifier un groupe de variables présentant une multicollinéarité modérée : NDVI (Indice de Végétation par Différence Normalisée) (VIF=1,488, Tolérance=0,672), LULC (Occupation du Sol) (VIF=1,619, Tolérance=0,618). Ces variables ont des valeurs de VIF comprises entre 1,5 et 2,5 et des valeurs de Tolérance comprises entre 0,4 et 0,7. Bien qu'elles puissent être incluses dans le modèle, leur impact sur les résultats devra être examiné attentivement.

Enfin, on peut identifier un groupe de variables présentant une multicollinéarité élevée : Plan Courbature (VIF=2,062, Tolérance=0,485), Distance aux cours d'eau (VIF=2,124, Tolérance=0,471), Élévation (VIF=2,154, Tolérance=0,464), Profil Courbature (VIF=2,198, Tolérance=0,455), Courbure (VIF=3,157, Tolérance=0,317). Ces variables ont des valeurs de VIF supérieures à 2,5 et des valeurs de Tolérance inférieures à 0,4, indiquant un niveau de multicollinéarité élevé. Leur inclusion simultanée dans le modèle pourrait entraîner des problèmes de stabilité et de fiabilité des résultats. Il est recommandé d'évaluer la possibilité de supprimer ou de combiner certaines de ces variables afin de réduire la multicollinéarité.

Le résultat démontre que l'analyse de la multicollinéarité montre que la plupart des variables peuvent être utilisées de manière fiable dans le modèle de prédiction des glissements de terrain, à l'exception de celles présentant un niveau de multicollinéarité élevé. Des ajustements peuvent être nécessaires pour ces dernières afin d'assurer la stabilité et la fiabilité des résultats du modèle (*Figure 60*)



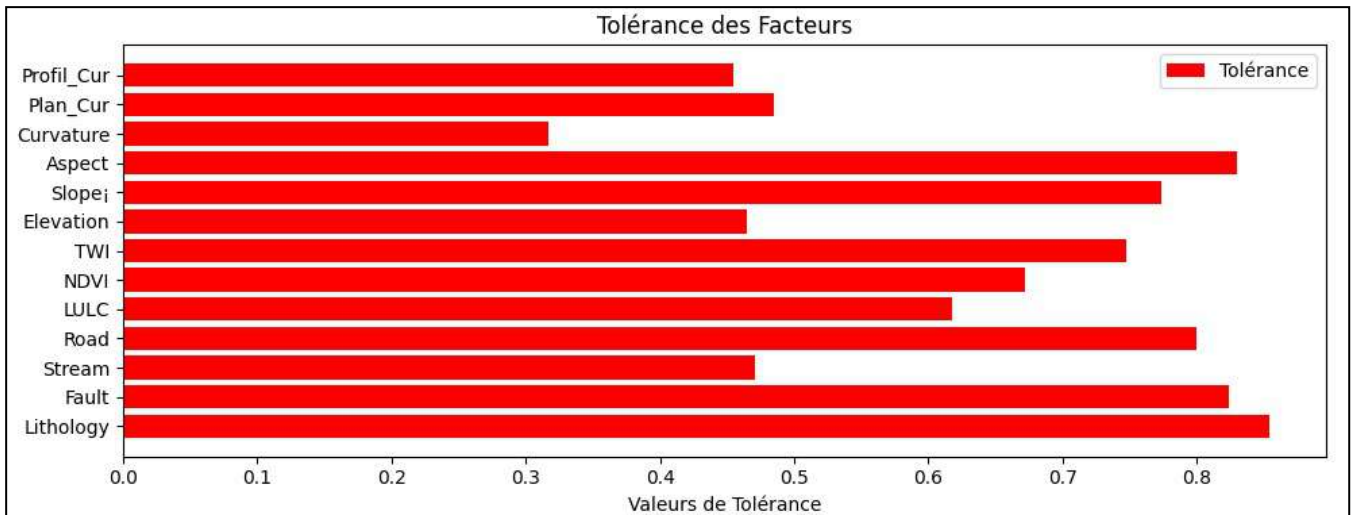


Figure 60 : Résultats du diagnostic de multicollinéarité des facteurs d'inflation de variance (VIF) et de tolérances

VI.8. Coefficient de corrélation de Pearson

Le coefficient de corrélation de Pearson (r) est une mesure de la force et de la direction de la relation linéaire entre deux variables. Il varie entre -1 et 1, avec -1 indiquant une corrélation négative parfaite, 0 indiquant l'absence de corrélation, et 1 indiquant une corrélation positive parfaite. L'Équation définit la manière de calculer ce coefficient, fournissant ainsi une représentation numérique du degré de relation linéaire entre les deux paramètres :

$$\rho_{x,y} = \frac{\text{Cov}(x,y)}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{[(x-\mu_x)(y-\mu_y)]}{\sigma_x \sigma_y}$$

Avec :

- $\text{Cov}(x,y)$ représente la covariance de x et y entre deux éléments ;
- σ_x et σ_y représentent les écarts-types de x et y ;
- μ_x et μ_y représentent les moyennes de x et y .

L'équation (3) représente l'espérance mathématique. Une valeur absolue du coefficient de corrélation de Pearson supérieure à 0,5 indique souvent un lien significatif entre deux paramètres (Wang et al., 2020c). La matrice des coefficients de corrélation de cette étude ne révèle pas de fortes corrélations entre les 13 facteurs de conditionnement, ce qui indique qu'aucun facteur de conditionnement n'a besoin d'être éliminé (Figure 61).

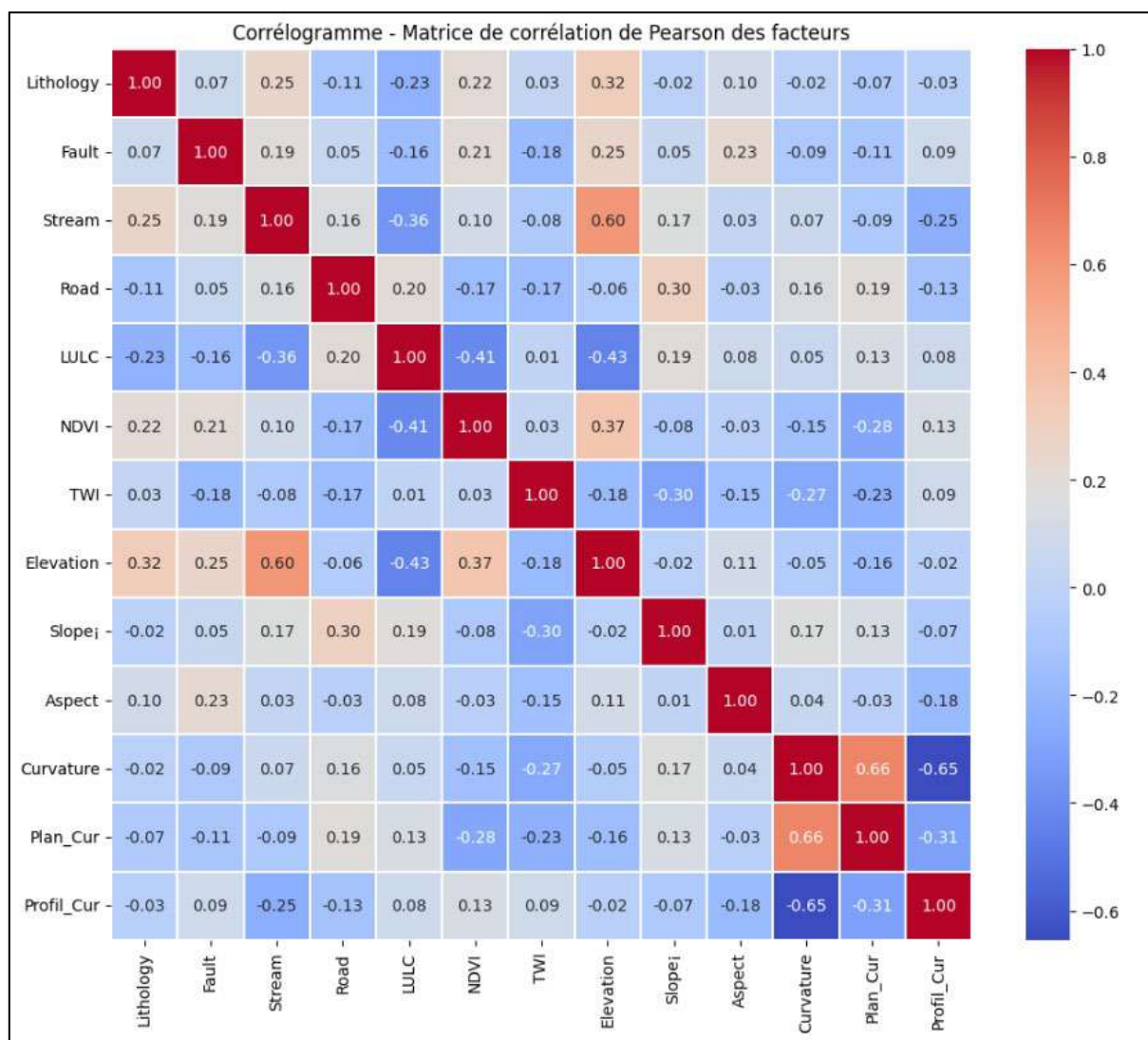


Figure 61 : Matrix de corrélation entre les différents facteurs du bassin versant de l'oued Amtar

VI.9. Cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain

L'évaluation de la susceptibilité aux mouvements de terrain dans le bassin versant de l'oued Amtar à l'aide de trois approches modélisatrices de Machine Learning, Random Forest (RF), Régression Logistique (LR) et Support Vector Machine (SVM), met en évidence cinq classes distinctes, allant d'un niveau de susceptibilité faible à très élevé (*Figure 62*).

On peut observer que les trois modèles identifient des zones susceptibles aux glissements de terrain, mais avec des différences dans la délimitation et l'étendue des classes. Pour la classe "Très faible", les trois modèles s'accordent sur des pourcentages très réduits, inférieurs à 1% de la zone d'étude. Pour la classe "Faible", les pourcentages varient de 4,35% pour le modèle LR à 6,69% pour le modèle SVM. Pour la classe "Modéré", on observe davantage de disparités, avec des pourcentages allant de 38,38% pour SVM à 47,65% pour RF. La classe "Élevé" présente les pourcentages les plus importants, compris

entre 42,58% pour RF et 47,65% pour LR. Enfin, pour la classe "Très élevé", les pourcentages sont plus faibles, avec 7,25% pour LR et 10,92% pour SVM. L'étendue spatiale notable des zones classées comme "Élevé" et "Très élevé" sur les cartes, couvrant une part significative du bassin versant (*Figure 62*).

D'après l'analyse comparative des résultats des trois modèles, on peut conclure que le bassin versant de l'oued Amtar présente une vulnérabilité élevée aux glissements de terrain (*Figure 63*). Ces informations seront utiles aux décideurs pour cibler les zones prioritaires à risque et mettre en place des mesures de prévention et de gestion adaptées afin de réduire l'impact des risques sur les populations, les infrastructures et l'environnement.

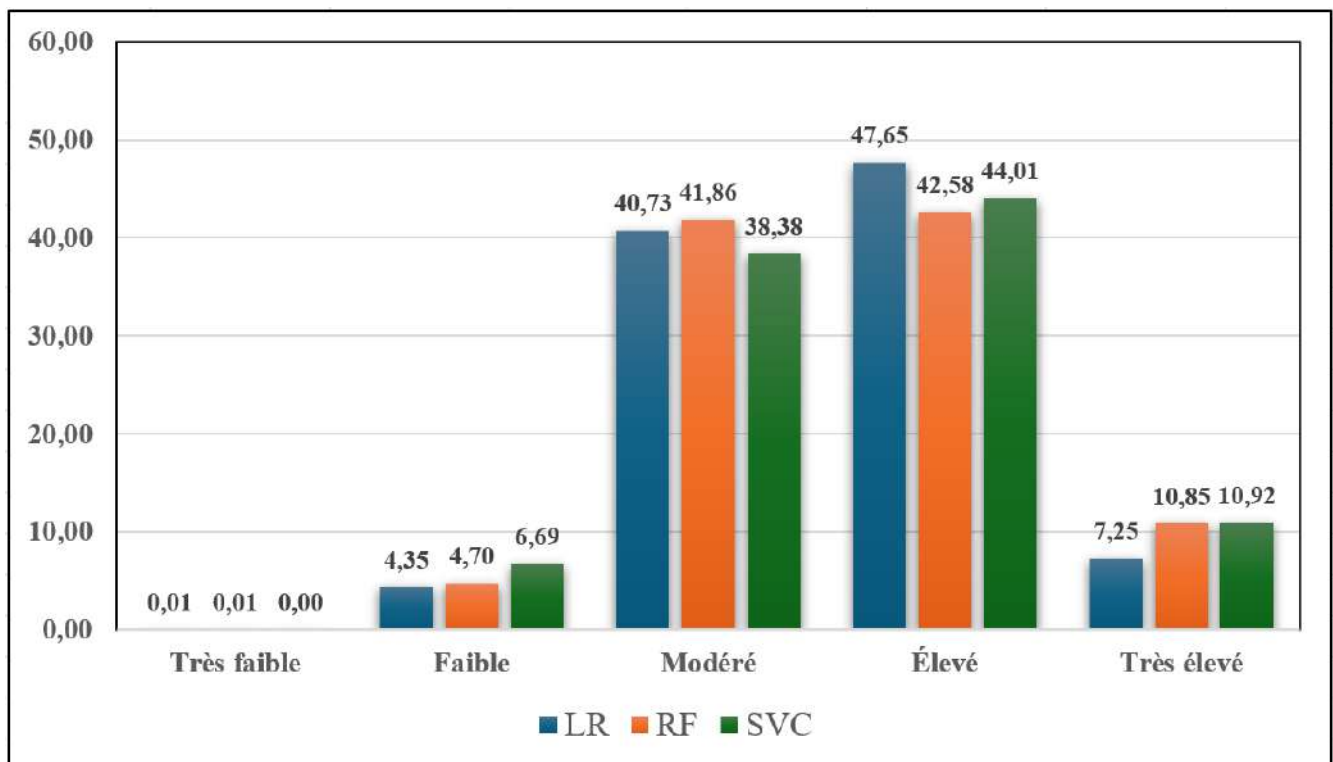


Figure 62 : Pourcentage de surface des classes de susceptibilité aux glissements de terrain du bassin versant de l'oued Amtar, à l'aide des modèles de machine Learning (LR, RF et SVM).

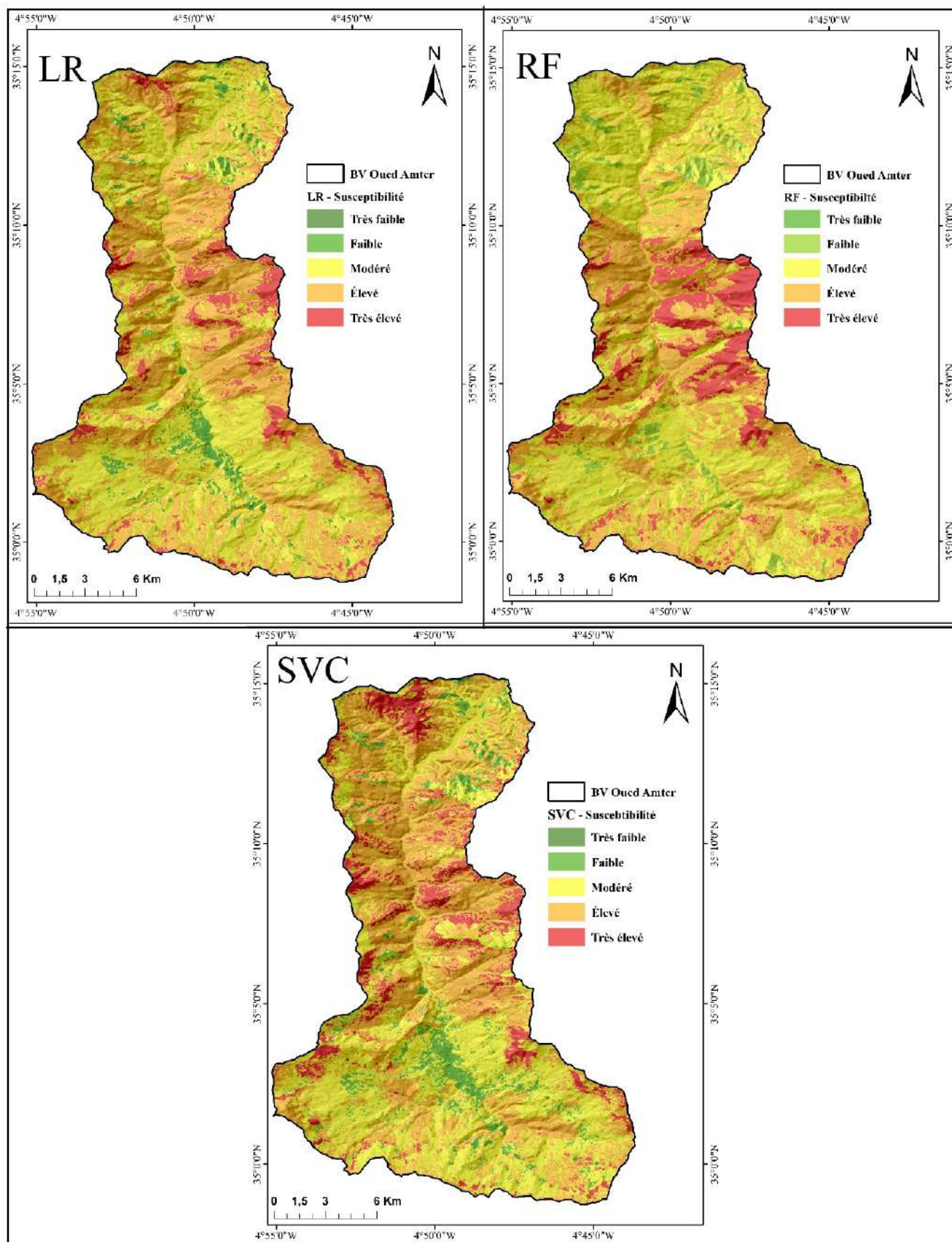


Figure 63 : Cartes de susceptibilité aux glissements de terrain du bassin versant de l'oued Amtar, générées à l'aide de Modèles LR, RF, et SVM

VI.10. Discussion

VI.10.1. Analyse des paramètres responsables

L'analyse des résultats montre que la zone d'étude est effectivement connue pour ses grandes instabilités gravitationnelles et qu'elle est sensible à la fois aux grands glissements de terrain, et aux phénomènes de moindre ampleur (érosion hydrique, etc...). Cela confirme que la méthode basée sur les modèles de Machine Learning utilisée est robuste et permet d'obtenir des résultats pertinents.

Cette étude vise à établir les liens entre les différents facteurs de susceptibilité aux glissements de terrain (conditions géologiques, topographie locale, réseau hydrographique, occupation du sol, etc...) et les enjeux présents dans la zone d'étude exposée à ces phénomènes. L'objectif est de formaliser ces relations par une cartographie du risque global de glissement de terrain (*Figure 64*).

L'étude des différents facteurs contribuant aux glissements de terrain dans le bassin versant de l'oued Amtar, révèle des éléments clés : (i) le réseau hydrographique dense et ramifié du bassin versant s'avère être un élément clé. L'oued Amtar, l'un des principaux cours d'eau, prend sa source dans les montagnes du Rif au sud et s'écoule vers le nord-est. Son débit élevé, notamment pendant la saison des pluies, entraîne une saturation du sol et une augmentation des pressions interstitielles, fragilisant ainsi la stabilité des versants. (ii) L'inclinaison de la pente (Slope) est l'un des facteurs topographiques les plus importants. Plus la pente est raide, plus la force de gravité est élevée, augmentant ainsi la probabilité de déstabilisation et de glissement. Les pentes raides ont souvent des sols plus minces et une couverture végétale plus clairsemée, réduisant la cohésion et le renforcement racinaire. De plus, les processus hydrologiques comme le ruissellement sont accélérés sur les fortes pentes, pouvant saturer les sols et diminuer leur résistance au cisaillement. (iii) L'élévation est également un facteur topographique essentiel. En général, les zones de haute altitude présentent une plus forte probabilité de glissements, car elles sont souvent caractérisées par des pentes plus raides, des sols plus minces et une végétation plus clairsemée. Cependant, l'effet de l'élévation n'est pas toujours linéaire, et certaines zones de moyenne altitude peuvent aussi être propices aux glissements, en fonction d'autres facteurs. (iv) L'occupation du sol (LULC) joue un rôle clé dans la stabilité des pentes. Les différents types d'occupation du sol ont des impacts contrastés sur la cohésion et la perméabilité des sols, ainsi que sur la protection offerte contre l'érosion. Les zones boisées ont généralement une plus grande stabilité grâce aux systèmes racinaires, tandis que les zones urbanisées ou les terres agricoles peuvent être plus fragiles face aux glissements de terrain. (v) Enfin, la géologie joue un rôle majeur dans la circulation des eaux de surface. Lorsque le bassin versant présente des formations géologiques très perméables sous une couverture végétale, la densité de drainage est faible, favorisant l'infiltration. À l'inverse, des formations

géologiques imperméables avec une végétation moyenne facilitent la circulation des eaux en surface, augmentant la densité de drainage et le ruissellement.

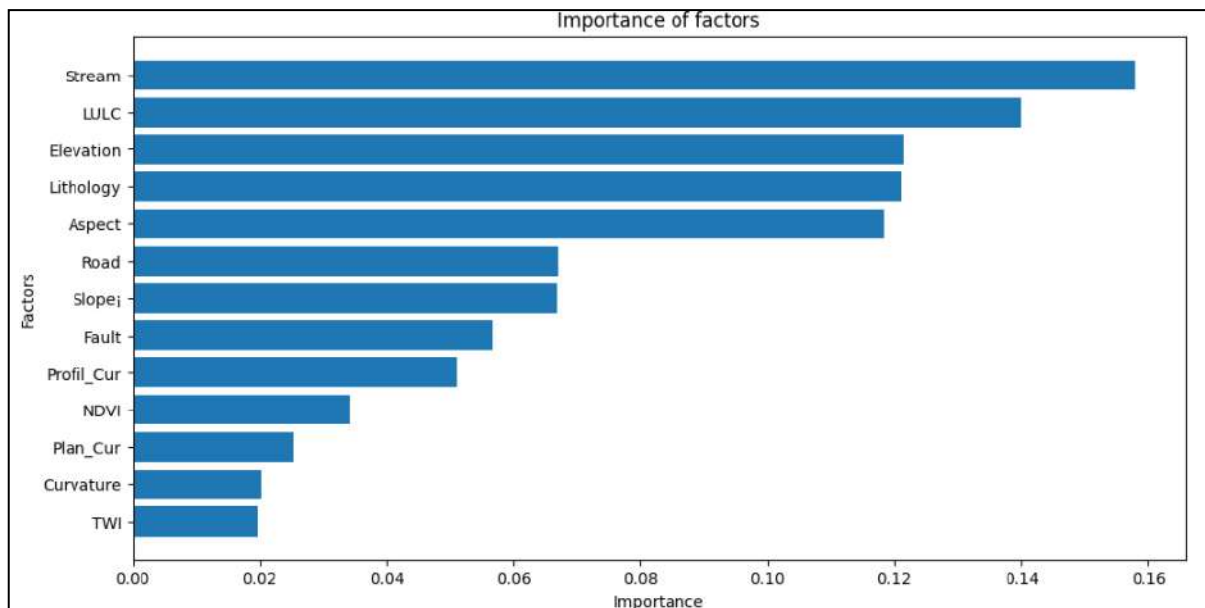


Figure 64 : Les paramètres responsables aux glissements de terrain du bassin versant de l'oued Amtar

L'analyse conjointe de ces différents facteurs, notamment la géologie du bassin versant, le réseau hydrographique, l'inclinaison de la pente, l'élévation et l'occupation du sol, semble fournir une bonne caractérisation du contexte physique de la zone d'étude. Cette analyse détaillée des facteurs de prédisposition aux glissements de terrain, en intégrant également l'inventaire géomorphologique des glissements observés. Ces paramètres de prédisposition aux glissements de terrain sera très utile pour la modélisation de la susceptibilité aux glissements dans cette région.

Les résultats de cette étude offrent aux responsables et décideurs les éléments techniques essentiels pour une gestion durable et sécuritaire du territoire, en anticipant et en limitant les risques naturels majeurs.

VI.10.2. Performances et validation des modèles

La validation et l'évaluation des performances des modèles développés dans le cadre de cette étude sont des étapes clés pour s'assurer de la fiabilité des résultats et de leur pertinence pour les décideurs. Plusieurs approches complémentaires ont été mises en œuvre.

Tout d'abord, une campagne d'inventaire détaillée des glissements de terrain existants a été menée sur le terrain. Ces données de terrain ont permis de confronter les zones identifiées comme instables par les modèles avec les observations in situ. Des mesures ponctuelles de paramètres hydrologiques et géotechniques ont également été réalisées pour évaluer la cohérence entre les valeurs utilisées dans les modèles et les conditions réelles.

Ensuite, différents modèles de prédiction de la susceptibilité aux glissements de terrain ont été développés, basés sur des approches statistiques, déterministes et expertes. Les résultats de ces différents modèles ont été comparés et analysés pour identifier les convergences et les divergences, renforçant ainsi la fiabilité des zones identifiées comme instables.

Enfin, une évaluation quantitative des performances a été menée. Des indicateurs statistiques classiques, tels que la précision globale, la sensibilité, la spécificité et l'aire sous la courbe ROC, ont été calculés. Ces indicateurs montrent que les modèles développés présentent de bonnes performances prédictives, avec une précision globale supérieure à 80% et une aire sous la courbe ROC dépassant 0,85 pour les meilleurs modèles.

Les valeurs de l'aire sous la courbe ROC (AUC) sont souvent utilisées pour évaluer les performances de classification des modèles. Plus le score AUC est élevé, meilleure est la capacité du modèle à distinguer les zones de glissement de terrain des zones de non-glissement, avec une classification binaire (0 pour non-glissement, 1 pour glissement).

La figure (*Figure 65*) montre les valeurs d'AUC pour les modèles Random Forest (RF), Régression Logistique (LR) et Support Vector Machine (SVM). Selon ces résultats d'évaluation, les trois modèles ont une performance élevée pour traiter ce type de données de glissement de terrain. Un score AUC supérieur à 0,9 indique que ces modèles sont en mesure de prédire avec une grande précision les zones susceptibles aux glissements de terrain et celles qui ne le sont pas. Cela montre la robustesse et la fiabilité de ces approches de modélisation pour cartographier la susceptibilité aux glissements de terrain dans la zone d'étude.

Les trois modèles évalués, à savoir Random Forest (RF), Régression Logistique (LR) et Support Vector Machine (SVM), présentent tous de bonnes performances avec des précisions supérieures à 90%. Ces mesures de performance statistiques et visuelles démontrent que ces trois modèles ont une capacité de prédiction élevée. Plus spécifiquement, les valeurs d'AUC (Aire Sous la Courbe ROC) indiquent que les modèles RF et LR ont une meilleure performance que le modèle SVM. Les scores AUC obtenus sont de 0,93 pour RF, 0,90 pour LR et 0,91 pour SVM.

Ces résultats montrent que les modèles RF et LR sont plus performants que le modèle SVM pour prédire les zones susceptibles aux glissements de terrain dans cette zone d'étude. Les cartes de susceptibilité générées par ces deux premiers modèles sont donc plus fiables et précises que celle produite par le modèle SVM.

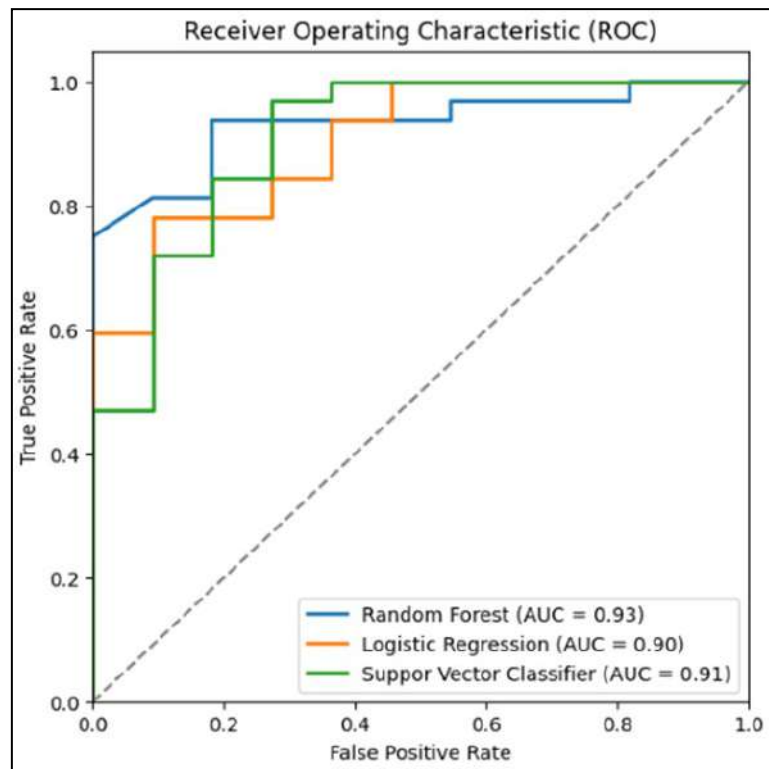


Figure 65 : Courbes de caractéristiques de fonctionnement du récepteur (ROC) empilées du modèle implémenté et leurs valeurs (AUC)

En conclusion, l'analyse des mesures de performance statistiques, notamment les valeurs d'AUC, ainsi que l'examen des cartes de susceptibilité, permettent de déterminer que les modèles RF et LR sont les plus adaptés et performants pour cartographier la susceptibilité aux glissements de terrain dans cette région. Leurs scores AUC supérieurs indiquent une meilleure capacité à distinguer les zones de glissement des zones stables.

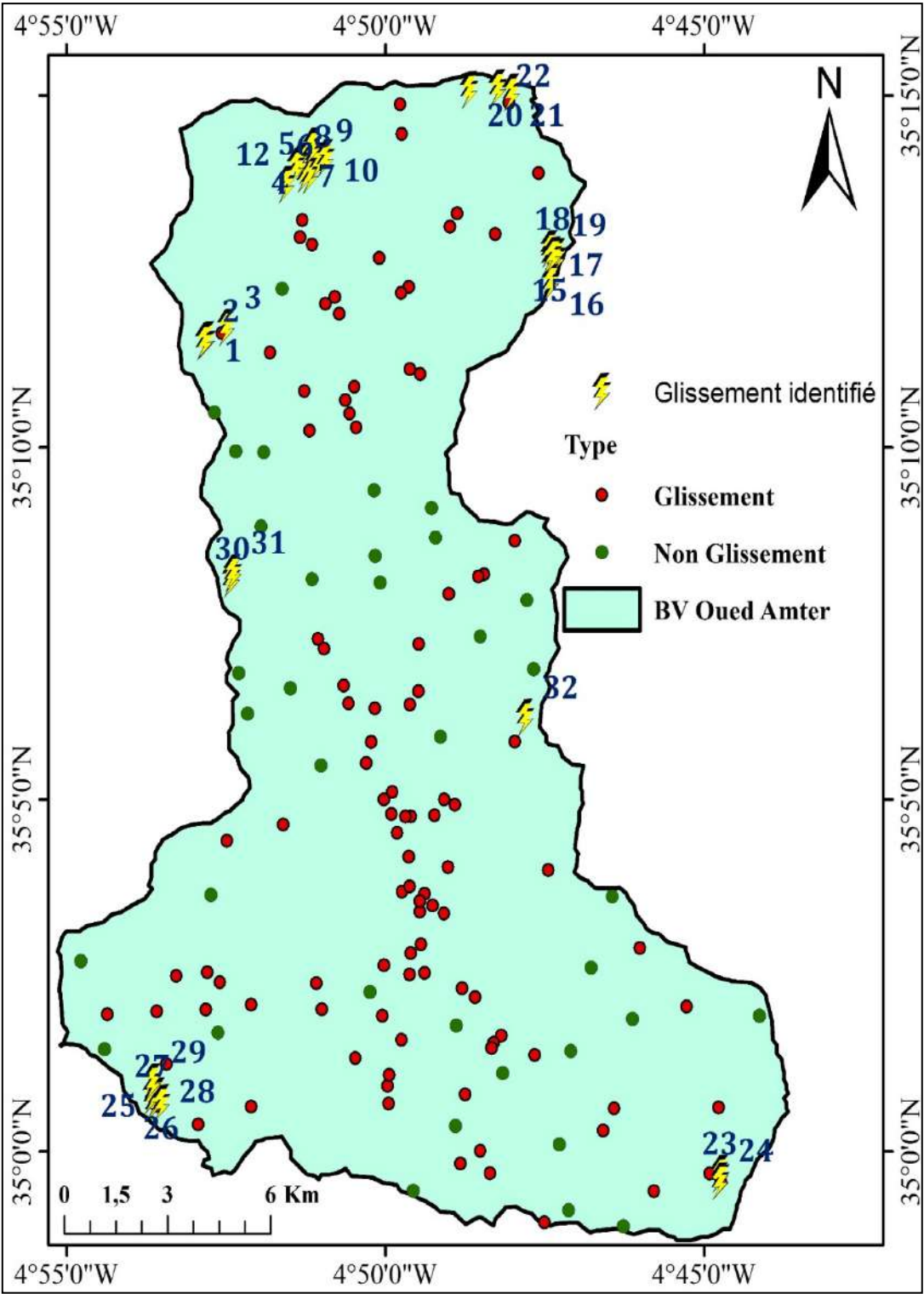


Figure 66 : Cartographie de l'inventaire géomorphologique des glissements de terrain actifs, élaboré par la mission terrain

CONCLUSION DU CHAPITRE VI

Cette étude démontre l'efficacité des techniques d'analyse morphologique et de SIG pour générer une base de données complète, nécessaire à l'application de modèles d'apprentissage automatique avancés tels que le Random Forest (RF), la Régression Logistique (LR) et la Machine à Vecteurs de Support (SVM) afin de cartographier la susceptibilité aux glissements de terrain dans le bassin versant d'oued Amtar au Maroc.

Les résultats obtenus sont très satisfaisants, avec des valeurs d'AUC (Aire Sous la Courbe ROC) supérieures à 0,90 pour les trois modèles, indiquant une prédiction fiable des zones susceptibles aux glissements de terrain. De plus, la comparaison des cartes de susceptibilité avec l'inventaire des glissements de terrain a confirmé la bonne correspondance entre les zones prédites comme à risque élevé et les événements historiques observés. Ces mesures de performance statistiques et visuelles démontrent que le modèle RF est le plus puissant et le plus performant pour classifier ce type de risque naturel.

Cette étude met en évidence la vulnérabilité du bassin versant d'oued Amtar aux différents types de mouvements de terrain, notamment les glissements, les mouvements complexes et les chutes de pierres. Ces résultats fournissent des informations cruciales pour la planification de l'utilisation des sols, l'évaluation des risques régionaux et le développement de mesures d'atténuation appropriées, en particulier le long des axes routiers et dans les zones habitées.

En conclusion, les cartes de susceptibilité aux glissements de terrain issues de cette étude constituent un outil essentiel d'aide à la décision pour les autorités locales, régional et centrale afin de mettre en place une gestion durable du bassin versant et de réduire l'impact des mouvements de terrain sur les activités anthropiques et l'environnement. Cette approche basée sur les meilleures pratiques en matière de modélisation et de cartographie des aléas naturels peut être reproduite dans d'autres régions exposées à ce type de risque.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

L'objectif était de fournir une évaluation détaillée de ces deux processus majeurs de dégradation des terres, afin d'orienter les stratégies de gestion durable des ressources naturelles dans cette région.

L'analyse morphométrique a d'abord permis d'identifier clairement les zones les plus vulnérables au risque d'érosion hydrique, en se basant sur les caractéristiques physiques des sous-bassins. Les sous-bassins 4, 7, 15, 18, 19 et 20 ont ainsi été classés en priorité "très élevée", tandis que les sous-bassins 1, 3, 5, 6, 9, 10 et 17 présentent un risque "élevé". Cette cartographie fine de la sensibilité à l'érosion constitue un outil essentiel pour cibler les interventions prioritaires de lutte contre ce phénomène.

L'application du modèle EPM a ensuite confirmé la forte sensibilité du bassin versant à l'érosion hydrique, avec plus de 50% de la surface soumise à une érosion "très élevée" et "catastrophique". Les principaux facteurs en cause, tels que la pente, la nature des sols et les pratiques agricoles, ont été identifiés, permettant d'orienter les actions de gestion durable des ressources en sols.

Enfin, l'évaluation quantitative du risque d'érosion par la méthode RUSLE a mis en évidence l'ampleur des pertes de terres, liées à la vulnérabilité naturelle des formations géologiques et à la pression anthropique. Cette cartographie fine de l'érosion hydrique constitue un outil précieux pour les gestionnaires du bassin, en vue d'une planification efficace des interventions de conservation des sols.

Concernant les glissements de terrain, les modèles de machine Learning (RF, LR et SVM) ont permis de cartographier les zones à risque avec une bonne précision. Les facteurs prépondérants identifiés, tels que la pente, la lithologie et l'occupation du sol, orientent les futurs aménagements et la gestion des zones exposées. Ces résultats constituent une base solide pour la mise en place de mesures préventives et de systèmes d'alerte adaptés.

Dans l'ensemble, cette thèse apporte une connaissance approfondie des processus d'érosion et de mouvements de terrain dans le bassin versant de l'oued Amtar. Elle fournit aux gestionnaires des outils d'aide à la décision essentiels pour mettre en place une gestion intégrée et durable de cette zone fragile, en tenant compte de la complexité des interactions entre les facteurs naturels et anthropiques.

L'analyse morphométrique a mis en évidence les caractéristiques physiques défavorables du bassin, comme des pentes prononcées, des sols peu cohésifs et un couvert végétal limité, favorisant les processus érosifs. Les modèles EPM et RUSLE ont confirmé ces résultats en identifiant clairement les zones les plus exposées à l'érosion hydrique, principalement sur les versants abrupts et dans les zones de transition entre les plateaux et les vallées.

CONCLUSION GENERALE

Concernant les mouvements de terrain, les modèles de machine Learning ont permis de cartographier avec une grande précision les secteurs les plus susceptibles aux glissements, en se basant sur une analyse approfondie des facteurs topographiques, géologiques, hydrologiques et d'occupation du sol. Ces analyses ont notamment révélé que les zones urbanisées, les pentes fortes et les zones de faiblesses géologiques sont les plus vulnérables à ce type de risque.

Les résultats obtenus dans le cadre de cette thèse fournissent ainsi des informations essentielles et des outils d'aide à la décision pour guider efficacement les autorités compétentes et les gestionnaires du territoire dans la mise en place de stratégies de prévention et de gestion durable des risques naturels dans le bassin de l'oued Amtar. L'ampleur et la précision des analyses menées ont permis de mieux comprendre les processus à l'origine de ces aléas, leurs impacts potentiels et les mesures à mettre en œuvre pour y faire face.

Au-delà de cette application locale, les méthodes développées dans cette thèse pourraient être reproduites sur d'autres bassins versants présentant des enjeux similaires. Cela contribuerait à améliorer la connaissance et la gestion des milieux hydrologiques à l'échelle régionale, voire nationale. En effet, l'analyse morphométrique, les modèles d'érosion (EPM et RUSLE) ainsi que les techniques de cartographie du risque de glissements de terrain par apprentissage automatique constituent des approches transposables à d'autres contextes géographiques. Leur application dans différentes régions permettrait de dresser un état des lieux plus global des processus d'érosion et de mouvements de terrain, facilitant la mise en place de stratégies de gestion à plus large échelle.

Par ailleurs, l'intégration de données de télédétection récentes et haute résolution (imagerie satellitaire, LiDAR, etc....) permettrait d'affiner encore davantage les analyses, notamment pour la cartographie de l'occupation du sol et la modélisation de l'érosion. Ces nouvelles sources d'information offriraient une vision plus précise et actualisée des facteurs clés influençant les phénomènes érosifs et les glissements de terrain. Elles permettraient également d'améliorer le suivi spatio-temporel de l'évolution de ces processus, facilitant la mise en place d'actions préventives et curatives adaptées.

Enfin, une approche interdisciplinaire et concertée, impliquant l'ensemble des acteurs du territoire, sera essentielle pour assurer l'efficacité et la pérennité des actions de gestion et de protection des ressources en eau et en sol. Cela passe par le renforcement des capacités locales, à travers des programmes de formation et d'accompagnement des gestionnaires, des élus et des populations riveraines. La sensibilisation de ces différents acteurs aux enjeux de l'érosion et des mouvements de terrain, ainsi que la mise en place de mécanismes de gouvernance adaptés, permettront une appropriation locale des problématiques et une mobilisation collective pour la mise en œuvre de

CONCLUSION GENERALE

solutions durables. Cette approche participative, combinée à l'expertise scientifique développée dans cette thèse, constituera un levier crucial pour relever les défis de la gestion intégrée du bassin versant de l'oued Amtar, et pourra être reproduite dans d'autres contextes similaires.

BIBLIOGRAPHIE

- Abbate A, Mancusi L, Frigerio A, Papini M, Longoni L (2023) CRHyME (Climatic rainfall hydro-geological model experiment): a new model for geo-hydrological hazard assessment at the basin scale. *Nat Haz Earth Syst Sci Discus* 1–51. <https://doi.org/10.5194/nhess-2023-15>
- Akhtar MS, Riaz M (2017) Comparative evaluation of RUSLE, MUSLE and EPM models for prediction of soil erosion. *Environ Monit Assess* 189(6):283
- Akoko G, Le TH, Gomi T, Kato T (2021) A review of SWAT model application in Africa. *Water* 13(9):1313. <https://doi.org/10.3390/w13091313>
- Alghamdi AG (2018) Biochar as a potential soil additive for improving soil physical properties—a review. *Arab J Geosci* 11(24):766. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-4056-7>
- Almagro A, Thomé TC, Colman CB, Pereira RB, Junior JM, Rodrigues DBB, Oliveira PTS (2019) Improving cover and management factor (C-factor) estimation using remote sensing approaches for tropical regions. *Int Soil Water Conserv Res* 7(4):325–334. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.08.005>
- Aloui S, Mazzoni A, Elomri A, Aouissi J, Boufekane A, Zghibi A (2023) A review of soil and water assessment tool (SWAT) studies of Mediterranean catchments: applications, feasibility, and future directions. *J Environ Manage* 326:116799. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116799>
- Al-Quraishi AMF (2003) Soil erosion risk prediction with RS and GIS for the Northwestern Part of Hebei Province, China. *J Appl Sci* 3(10–12):659–669
- Al-Quraishi AMF (2004) Assessment of soil erosion risk using RUSLE and geoinformation technology for North Shaanxi Province, China. *J China Univ Geosci* 15:31–39
- Argaz, A., Ouahman, B., Darkaoui, A., Bikhtar, H., Ayouch, E., & Lazaar, R. (2019). Flood hazard mapping using remote sensing and GIS Tools: A case study of souss watershed. *Journal of Materials and Environmental Science*, 10(2), 170–181.
- Azdimousa A, Jabaloy-Sánchez A, Talavera C, Asebriy L, González-Lodeiro F, Evans NJ (2019) Detrital zircon U-Pb ages in the Rif Belt (northern Morocco): paleogeographic implications. *Gondwana Res* 70:133–150. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2018.12.008>
- Azzouz, O., El Fellah, B., & Chalouan, A. (2002). Processus de glissement dans le Massif de Bokoya (Rif interne, Maroc): exemple de Cala Bonita. *Bulletin de l'Institut scientifique, Rabat, section Sciences de la Terre*, 24, 33-40.
- Bag R, Mondal I, Dehbozorgi M, Bank SP, Das DN, Bandyopadhyay J, Al-Quraishi AMF, Nguyen XC (2022) Modelling and mapping of soil erosion susceptibility using machine learning in a tropical

hot sub-humid environment. J Clean Prod 364:132428. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132428>

- Bagheri M, Ibrahim ZZ, Mansor S, Abd Manaf L, Akhir MF, Talaat WIAW, Wolf ID (2023) Hazard assessment and modeling of erosion and sea level rise under global climate change conditions for coastal city management. Nat Hazard Rev 24(1):04022038. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)NH.1527-6996.0000593](https://doi.org/10.1061/(ASCE)NH.1527-6996.0000593)
- Baharvand S, Pradhan B (2022) Erosion and flood susceptibility evaluation in a catchment of Kopet-Dagh mountains using EPM and RFM in GIS. Environ Earth Sci 81:490. <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10598-0>
- Bammou Y, Benzougagh B, Bensaid A, Igmoullan B, Al-Quraishi AMF (2023) Mapping of current and future soil erosion risk in a semi-arid context (haouz plain-Marrakech) based on CMIP6 climate models, the analytical hierarchy process (AHP) and RUSLE. Model Earth Syst Environ 1–14. <https://doi.org/10.1007/s40808-023-01845-9>
- Barakat A, Rafai M, Mosaid H, Islam MS, Saeed S (2023) Mapping of water-induced soil erosion using machine learning models: a case study of Oum Er Rbia Basin (Morocco). Earth Syst Environ 7(1):151–170. <https://doi.org/10.1007/s41748-022-00317-x>
- Bazhenova OI, Tyumentseva EM, Golubtsov VA (2022) Soil erosion on the agricultural lands of the Asian Part of Russia (Siberia): processes, intensity and areal distribution. In Global degradation of soil and water resources: regional assessment and strategies. Springer Nature Singapore, Singapore, pp 475–497. https://doi.org/10.1007/978-981-16-7916-2_30
- Benzougagh B, Baamar B, Dridri A, Boudad L, Sadkaoui D, Mimich K (2020a) Relationship between landslide and morpho-structural analysis: a case study in Northeast of Morocco. Appl Water Sci 10(7):1–10. <https://doi.org/10.1007/s13201-020-01258-4>
- Benzougagh B, Boudad Larbi P, Dridri Abdallah P, Driss S (2016) Translation: “utilization of GIS in morphometric analysis and prioritization of sub-watersheds of Oued Inaouene (Northeast Morocco). Europ Sci J 12(6). <https://doi.org/10.19044/esj.2016.v12n6p266>
- Benzougagh B, Dridri A, Boudad L, Baamar B, Sadkaoui D, Khedher KM (2022) Identification of critical watershed at risk of soil erosion using morphometric and geographic information system analysis. Appl Water Sci 12:1–20. <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01532-z>
- Benzougagh B, Dridri A, Boudad L, Kodad O, Sdkaoui D, Bouikbane H (2017) Evaluation of natural hazard of Inaouene Watershed River in Northeast of Morocco: application of morphometric and geographic information system approaches. Int J Innov Appl Stud 19(1):85
- Benzougagh B, Meshram SG, Fellah BE (2023) Mapping of land degradation using spectral angle mapper approach (SAM): the case of Inaouene watershed (Northeast Morocco) Model. Earth Syst Environ <https://doi.org/10.1007/s40808-023-01711-8>

- Benzougagh B, Sarita GM, Dridri A, Boudad L, Sadkaoui D, Mimich K, Khaled MK (2020b) Mapping of soil sensitivity to water erosion by RUSLE model: case of the Inaouene watershed (Northeast Morocco). *Arab J Geosci* 13(21):1–15. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-06079-y>
- Benzougagh, B. et al. (2024). Spectral Angle Mapper Approach (SAM) for Land Degradation Mapping: A Case Study of the Oued Lahdar Watershed in the Pre-Rif Region (Morocco). In: Al-Quraishi, A.M.F., Mustafa, Y.T. (eds) *Natural Resources Deterioration in MENA Region*. Earth and Environmental Sciences Library. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-58315-5_2
- Benzougagh, B., Boudad Larbi, P., Dridri Abdallah, P., & Driss, S. (2016). Utilisation Du Sig Dans L'analyse Morphométrique Et La Prioritisation Des Sous-Bassins Versants De Oued Inaouene (Nord-Est Du Maroc). *European Scientific Journal*, 12(6). <http://dx.doi.org/10.19044/esj.2016.v12n6p266>
- Benzougagh, B., Dridri, A., Boudad, L., Kodad, O., Sdkaoui, D., & Bouikbane, H. (2017). Evaluation of natural hazard of Inaouene Watershed River in Northeast of Morocco: application of Morphometric and Geographic Information System approaches. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 19(1), 85.
- Benzougagh, B., Meshram, S. G., Dridri, A., Boudad, L., Baamar, B., Sadkaoui, D., & Khedher, K. M. (2022). Identification of critical watershed at risk of soil erosion using morphometric and geographic information system analysis. *Applied Water Science*, 12, 1-20. <https://doi.org/10.1007/s13201-023-01963-w>
- Benzougagh, B., Meshram, S. G., Fellah, B. E., Mastere, M., El Basri, M., Ouchen, I., ... & Turyasingura, B. (2023). Mapping of land degradation using spectral angle mapper approach (SAM): the case of Inaouene watershed (Northeast Morocco). *Modeling Earth Systems and Environment*, 1-11. <https://doi.org/10.1007/s40808-023-01711-8>
- Berhanu B, Bisrat E (2018) Identification of surface water storing sites using topographic wetness index (TWI) and normalized difference vegetation index (NDVI). *J Nat Resourc Dev* 8:91–100. <https://doi.org/10.5027/jnrd.v8i0.09>
- Boote KJ, Jones JW, Pickering NB (1996) Potential uses and limitations of crop models. *Agron J* 88(5):704–716. <https://doi.org/10.2134/agronj1996.00021962008800050005x>
- Boukhres, N., Mastere, M., Thiery, Y., Maquaire, O., El Fellah, B., & Costa, S. (2023). A comparative modeling of landslides susceptibility at a meso-scale using frequency ratio and analytic hierarchy process models in geographic information system: the case of African Alpine Mountains (Rif, Morocco). *Modeling Earth Systems and Environment*, 9(2), 1949-1975.

BIBLIOGRAPHIE

- Cerbelaud A, Lefèvre J, Genthon P, Menkes C (2022) Assessment of the WRF-Hydro uncoupled hydro-meteorological model on flashy watersheds of the Grande Terre tropical island of New Caledonia (South-West Pacific). *J Hydrol Region Stud* 40:101003. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101003>
- Chalise D, Kumar L, Spalevic V, Skataric G (2019) Estimation of sediment yield and maximum outflow using the IntErO model in the Sarada river basin of Nepal. *Water* 11(5):952. <https://doi.org/10.3390/w11050952>
- Chalouan A, Michard A (2004) The Alpine Rif Belt (Morocco): a case of mountain building in a subduction-subduction-transform fault triple junction. *Pure Appl Geophys* 161:489–519. <https://doi.org/10.1007/s00024-003-2460-7>
- Chalouan A, Michard A, Kadiri KE, Negro F, Lamotte DFD, Soto JI, Saddiqi O (2008) The rif belt. Continental evolution: the geology of Morocco: structure, stratigraphy, and tectonics of the Africa-Atlantic-Mediterranean triple junction, 203–302. https://doi.org/10.1007/978-3-540-77076-3_5
- Chen J, Li Z, Xiao H, Ning K, Tang C (2021) Effects of land use and land cover on soil erosion control in southern China: implications from a systematic quantitative review. *J Environ Manage* 282:111924. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111924>
- Chen S, Zhang G, Zhu P, Wang C, Wan Y (2023) Impact of land use type on soil erodibility in a small watershed of rolling hill northeast China. *Soil Tillage Res* 227:105597
- Danchenkov A, Belov N, Bubnova E, Myslenkov S (2023) Fore dune defending role: vulnerability and potential risk through combined satellite and hydrodynamics approach. *Remote Sens Appl Soc Environ* 30:100934. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.100934>
- Dang DN, Lanarde L, Jeannin M, Sabot R, Refait P (2015) Influence of soil moisture on the residual corrosion rates of buried carbon steel structures under cathodic protection. *Electrochim Acta* 176:1410–1419
- Das J, Saha P, Mitra R, Alam A, Kamruzzaman M (2023) GIS-based data-driven bivariate statistical models for landslide susceptibility prediction in Upper Tista Basin, India. *Heliyon* 9(5). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16186>
- De Oliveira Oliveira VFR, Vick EPV, Bacani VMB (2023) Analysis of seasonal environmental fragility using the normalized difference vegetation index (NDVI) and soil loss estimation in the Urutu watershed, Brazil. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2557676/v1>
- Dragičević N, Karleuša B, Ožanić N (2018) Modification of erosion potential method using climate and land cover parameters. *Geomat Nat Haz Risk* 9(1):1085–1105. <https://doi.org/10.1080/19475705.2018.1496483>

BIBLIOGRAPHIE

- Durand-Delga M, Gardin S, Olivier P (1999) Datation des flyschs éocénés maurétaniens des Maghrébides: la formation du Jbel Tisirène (Rif, Maroc). *Comptes Rendus De L'académie Des Sciences-Series IIA-Earth and Planetary Science* 328(10):701–709. [https://doi.org/10.1016/S1251-8050\(99\)80180-3](https://doi.org/10.1016/S1251-8050(99)80180-3)
- Ebabu K, Tsunekawa A, Haregeweyn N, Adgo E, Meshesha DT, Aklog D, Yibeltal M (2019) Effects of land use and sustainable land management practices on runoff and soil loss in the Upper Blue Nile basin, Ethiopia. *Sci Total Environ* 648:1462–1475. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.273>
- Efthimiou N, Lykoudi E, Karavitis C (2017) Comparative analysis of sediment yield estimations using different empirical soil erosion models. *Hydrol Sci J* 62(16):2674–2694. <https://doi.org/10.1080/02626667.2017.1404068>
- El Badaoui, K., Algouti, A., Algouti, A., & Hadach, F. (2021). Analyse des sédiments de la rivière du Toudgha et l'évolution de l'occupation du sol du bassin versant, (Flanc sud du haut Atlas central. Maroc). *Journal International Sciences et Technique de l'Eau et de l'Environnement*, 6(1), 9–20.
- El Brahimi M, El Fellah B, Mastere M, Benzougagh B, El Basri M, Fartas N (2022) Quantification of soil sensitivity to water erosion by the RUSLE model in the Oued Amtar Water-shed, NorthWestern Morocco. *Iraqi Geol J* 41–56. <https://doi.org/10.46717/igj.55.2C.4ms-2022-08-17>
- El Brahimi, M. et al. (2024). GIS-Based Erosion Potential Method (EPM) for Soil Degradation Evaluation: A Case Study the Northeast of Morocco. In: Al-Quraishi, A.M.F., Mustafa, Y.T. (eds) *Natural Resources Deterioration in MENA Region*. Earth and Environmental Sciences Library. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-58315-5_8
- El Brahimi, M., Mastere, M., Benzougagh, B. et al. Assessing soil erosion vulnerability through geospatial morphometric analysis in the Oued Amtar Basin (Northwest Morocco). *Euro-Mediterr J Environ Integr* (2024). <https://doi.org/10.1007/s41207-024-00493-4>
- El Fellah, B. (2005). Géomorphologie et cartographie du bassin versant de l'oued Smir. Ecosystèmes côtiers sensibles de la Méditerranée : cas du littoral de Smir. *Trav. Inst. Sci. Série générale*, (4), 1-8.
- El Ghouli I, Sellami H, Khelifi S, Vanclooster M (2023) Impact of land use land cover changes on flow uncertainty in Siliana watershed of northwestern Tunisia. *CATENA* 220:106733. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106733>
- EL Hilali M, Bounab A, Timoulali Y, El Messari JES, Ahniche M (2023) Seismic site-effects assessment in a fluvial sedimentary environment: case of Oued Martil floodplain Northern Morocco. *Nat Haz* 1–23. <https://doi.org/10.1007/s11069-023-06032-8>

BIBLIOGRAPHIE

- El Kateb H, Zhang H, Zhang P, Mosandl R (2013) Soil erosion and surface runoff on different vegetation covers and slope gradients: a field experiment in Southern Shaanxi Province, China. CATENA 105:1–10. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.12.012>
- Elaloui A, Khalki EME, Namous M, Ziadi K, Eloudi H, Faouzi E, Chehbouni A (2022) Soil erosion under future climate change scenarios in a semi-arid region. Water 15(1):146. <https://doi.org/10.3390/w15010146>
- Elliot WJ, Flanagan DC (2023) Estimating WEPP cropland soil erodibility from soil properties. In Soil erosion research under a changing climate, January 8–13, 2023, Aguadilla, Puerto Rico, USA (p 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers. <https://doi.org/10.13031/soil.23010>
- Ennaji, N., Ouakher, H., Halouan, S., & Abahrour, M. (2022, October). Assessment of soil erosion rate using the EPM model: case of Ouauoumana basin, Middle Atlas, Morocco. In *IOP conference series: earth and environmental science* (Vol. 1090, No. 1, p. 012004). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1090/1/012004>
- Eswaran H, Lal R, Reich PF (2019) Land degradation: an overview. Response Land Degrad 20–35. <https://doi.org/10.1201/9780429187957>
- Fartas, N., El Fellah, B., Mastere, M., Benzougagh, B., & El Brahimi, M. (2022). Potential soil erosion modeled with RUSLE approach and geospatial techniques (GIS tools and remote sensing) in Oued Joumouaa watershed (Western Prerif-Morocco). The Iraqi Geological Journal, 47-61. <https://doi.org/10.46717/igj.55.2B.5Ms-2022-08-21>
- Föeger LB, Buarque DC, Pontes PRM, de Oliveira Fagundes H, Fan FM (2022) Large-scale sediment modeling with inertial flow routing: assessment of Madeira River basin. Environ Model Softw 149:105332. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105332>
- Gao J, Zhang Y, Zuo L (2023) The optimal explanatory power of soil erosion and water yield in karst mountainous areas. J Geog Sci 33(10):2077–2093. <https://doi.org/10.1007/s11442-023-2166-y>
- Gavrilovic M (1972) Crimes within the territory of the Socialist Republic of Serbia. Yugoslavian J Crimin Crim L 10:479
- Gavrilovic Z, Stefanovic M, Milovanovic I, Cotric J, Milojevic M (2008) Torrent classification–base of rational management of erosive regions. In: IOP conference series: earth and environmental science (vol 4(1)). IOP publishing, p 012039. <https://doi.org/10.1088/1755-1307/4/1/012039>
- Gavrilovic, I. T., Hormigo, A., Yahalom, J., DeAngelis, L. M., & Abrey, L. E. (2006). Long-term follow-up of high-dose methotrexate-based therapy with and without whole brain irradiation for newly diagnosed primary CNS lymphoma. *Journal of Clinical Oncology*, 24(28), 4570–4574.

BIBLIOGRAPHIE

- Ghobadi Y, Pirasteh S, Pradhan B, Ahmad NB, Shafri HZBM, Sayyad GA, Kabiri K (2011) Determine of correlation coefficient between EPM and MPSIAC models and generation of erosion maps by GIS techniques in Baghmalek watershed, Khuzestan, Iran. In Proceedings of the 5th Symposium on Advances in Science and Technology SASTech, Mashhad, Iran (pp 1–12)
- Ghosh A, Rakshit S, Tikle S, Das S, Chatterjee U, Pande CB, Mattar MA (2022) Integration of GIS and remote sensing with RUSLE model for estimation of soil erosion. *Land* 12(1):116. <https://doi.org/10.3390/land12010116>
- Gimeno-Vives O, Mohn G, Bosse V, Haissen F, Zaghloul MN, Atouabat A, de Lamotte DF (2020) Reply to comment by Michard et al. on “The mesozoic margin of the maghrebien tethys in the rift belt (Morocco): evidence for polyphase rifting and related magmatic activity”. *Tectonics* 39. <https://doi.org/10.1029/2020TC006165>
- Girma R, Gebre E (2020) Spatial modeling of erosion hotspots using GIS-RUSLE interface in Omo-Gibe River basin, Southern Ethiopia: implication for soil and water conservation planning. *Environ Syst Res* 9(1):1–14. <https://doi.org/10.1186/s40068-020-00180-7>
- Guisan A, Thuiller W (2005) Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecol Lett* 8(9):993–1009. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2005.00792.x>
- Hagras A (2023) Estimating water erosion in the EL-Mador Valley Basin, South-West Matrouh City, Egypt, using revised universal soil loss equation (RUSLE) model through GIS. *Environ Earth Sci* 82(1):47. <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10722-0>
- Halder JC (2023) The integration of RUSLE-SDR lumped model with remote sensing and GIS for soil loss and sediment yield estimation. *Adv Space Res* 71(11):4636–4658. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.01.008>
- Hernández-Molina FJ, Sierro FJ, Llave E, Roque C, Stow DAV, Williams T, Brackenridge RE (2016) Evolution of the gulf of Cadiz margin and southwest Portugal contourite depositional system: tectonic, sedimentary and paleoceanographic implications from IODP expedition 339. *Mar Geol* 377:7–39. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2015.09.013>
- Hosseini M, Ashraf MA (2015) Application of the SWAT model for water components separation in Iran. Springer Japan. <https://doi.org/10.1007/978-4-431-55564-3>
- Hossini H, Karimi H, Mustafa YT, Al-Quraishi AMF (2022) Role of effective factors on soil erosion and land degradation: a review. In: *Environmental degradation in Asia: land degradation, environmental contamination, and human activities*. pp 221–235 https://doi.org/10.1007/978-3-031-12112-8_11

BIBLIOGRAPHIE

- Istanbulluoglu E, Bras RL (2005) Vegetation-modulated landscape evolution: effects of vegetation on landscape processes, drainage density, and topography. *J Geophys Res Earth Surf* 110(F2). <https://doi.org/10.1029/2004JF000249>
- Kabo-Bah KJ, Guoan T, Yang X, Na J, Xiong L (2021) Erosion potential mapping using analytical hierarchy process (AHP) and fractal dimension. *Heliyon* 7(6). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07125>
- Kadam AK, Umrikar BN, Sankhua RN (2018) Assessment of soil loss using revised universal soil loss equation (RUSLE): a remote sensing and GIS approach. *Remote Sensing of Land*, 2(1), 65–75. <https://doi.org/10.21523/gcjl.18020105>
- Kader S, Jaufer L, Bashir O, Olalekan Raimi M (2023) A comparative study on the stormwater retention of organic waste substrates niochar, sawdust, and wood bark recovered from *Psidium Guajava* L. Species. *Agric For* 69(1):105–112. <https://doi.org/10.17707/AgricultForest.69.1.09>
- Kader S, Raimi MO, Spalevic V, Iyingiala AA, Bukola RW, Jaufer L, Butt TE (2023) A concise study on essential parameters for the sustainability of Lagoon waters in terms of scientific literature. *Turkish J Agric For* 47(3):288–307. <https://doi.org/10.55730/1300-011X.3087>
- Kader, S., Novicevic, R., Jaufer, L. (2022). Soil management in sustainable agriculture: analytical approach for the ammonia removal from the dairy manure. *Agric For* 68(4):69–78. <https://doi.org/10.17707/AgricultForest.68.4.06>
- Kebede L, Temesgen M, Fanta A, Kebede A, Rockström J, Melesse AM (2023) Effect of locally adapted conservation tillage on runoff, soil erosion, and agronomic performance in semiarid rain-fed farming in Ethiopia. *Land* 12(3):593. <https://doi.org/10.3390/land12030593>
- Kefi M, Yoshino K, Setiawan Y (2012) Assessment and mapping of soil erosion risk by water in Tunisia using time series MODIS data. *Paddy Water Environ* 10:59–73. <https://doi.org/10.1007/s10333-011-0265-3>
- Kumar G, Kurothe RS, Viswakarma AK, Mandal D, Sena DR, Mandal U, Dinesh D (2023) Assessment of soil vulnerability to erosion in different land surface configurations and management practices under semi-arid monsoon climate. *Soil Tillage Res* 230:105698. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105698>
- Lamane H, Moussadek R, Baghdad B, Mouhir L, Briak H, Laghlimi M, Zouahri A (2022) Soil water erosion assessment in Morocco through modeling and fingerprinting applications: a review. *Heliyon*. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10209>
- Lense GHE, Lämmle L, Ayer JEB, Lama GFC, Rubira FG, Mincato RL (2023) Modeling of soil loss by water erosion and its impacts on the Cantareira system, Brazil. *Water* 15(8):1490. <https://doi.org/10.3390/w15081490>

BIBLIOGRAPHIE

- Li P, Chen J, Zhao G, Holden J, Liu B, Chan FKS, Mu X (2022) Determining the drivers and rates of soil erosion on the loess plateau since 1901. *Sci Total Environ* 823:153674. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153674>
- Liu B, Xie Y, Li Z, Liang Y, Zhang W, Fu S, Guo Q (2020) The assessment of soil loss by water erosion in China. *Int Soil Water Conserv Res* 8(4):430–439. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2020.07.002>
- Llanos-Paez O, Estrada L, Pastén-Zapata E, Boithias L, Jorda-Capdevila D, Sabater S, Acuña V (2023) Spatial and temporal patterns of flow intermittency in a Mediterranean basin using the SWAT+ model. *Hydrol Sci J* 68(2):276–289. <https://doi.org/10.1080/02626667.2022.2155523>
- Maliqi E, Singh SK (2019) Quantitative estimation of soil erosion using open-access earth observation data sets and erosion potential model. *Water Conserv Sci Eng* 4:187–200. <https://doi.org/10.1007/s41101-019-00078-1>
- Marko O, Gjoka K, Shkodrani N, Gjipalaj J (2023) Climate change effect on soil erosion in Vjosa River Basin. *J Ecol Eng* 24(2):92–100. <https://doi.org/10.12911/22998993/156831>
- Marouane, L., Lahcen, B., & Valérie, M. (2021). Assessment and mapping of water erosion by the integration of the Gavrilovic “EPM” model in the Inaouene watershed, Morocco. In *E3S web of conferences* (Vol. 314, p. 03009). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202131403009>
- Mastere, M. (2011). LA SUSCEPTIBILITE AUX MOUVEMENTS DE TERRAIN DANS LA PROVINCE DE CHEFCHAOUEN (Rif Central, Maroc) (Doctoral dissertation, Université de Bretagne occidentale-Brest).
- Mastere, M. (2011). La susceptibilité aux mouvements de terrain dans la province de Chefchaouen: Analyse spatiale, modélisation probabiliste multi-échelle et impacts sur l'aménagement & l'urbanisme.
- Mastere, M., Vliet-Lanoë, B. V., & Brahim, L. A. (2013). Cartographie de l'occupation des sols en relation avec les mouvements gravitaires et le ravinement dans le Rif nord-occidental (Maroc). *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 19(3), 335-352. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.10328>
- Mehwish M, Nasir MJ, Raziq A, Al-Quraishi AMF (2024) Soil erosion vulnerability and soil loss estimation for Siran River watershed, Pakistan: an integrated GIS and remote sensing approach. *Environ Monit Assess* 196:104. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-12262-x>
- Meshesha TW, Wang J, Melaku ND, McClain CN (2021) Modelling groundwater quality of the Athabasca River Basin in the subarctic region using a modified SWAT model. *Sci Rep* 11(1):13574. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-92920-7>

BIBLIOGRAPHIE

- Mesrar H, Sadiki A, Navas A, Faleh A, Quijano L, Chaaouan J (2015) Soil erosion and causal factors modeling, case of the Sahla catchment, Central Rif, Morocco. *Zeitschrift Für Geomorphologie* 59(4):495–514. <https://doi.org/10.1127/zfg/2015/0169>
- Michard A, Saddiqi O, Chalouan A, Chabou MC, Lach P, Rossi P, Youbi N (2020) Comment on “the mesozoic margin of the maghrebien tethys in the rif belt (Morocco): evidence for poly-phase rifting and related magmatic activity” by Gimeno-Vives et al. *Tectonics* 39(4): e2019TC006004. <https://doi.org/10.1029/2019TC006004>
- Micić Ponjiger T, Lukić T, Wilby RL, Marković SB, Valjarević A, Dragičević S, Morar C (2023) Evaluation of rainfall erosivity in the western balkans by mapping and clustering ERA5 reanalysis data. *Atmosphere* 14(1):104. <https://doi.org/10.3390/atmos14010104>
- Mihi A, Benarfa N, Arar A (2020) Assessing and mapping water erosion-prone areas in northeastern Algeria using analytic hierarchy process, USLE/RUSLE equation, GIS, and remote sensing. *Appl Geomat* 12(2):179–191. <https://doi.org/10.1007/s12518-019-00289-0>
- Morgan RPC (2009) Soil erosion and conservation. John Wiley & Sons
- Neupane B, Mandal U, Al-Quraishi A, Ozdemir M (2023) Environmental threat of soil erosion in the Gwang Khola watershed, Chure Region of Nepal. *Iraqi Geol J* 56:194–206. <https://doi.org/10.46717/igj.56.1e.14ms-2023-5-24>
- Najia, F., Bouchta, E., Mohamed, M., Benzougagh, B., & El Brahimi, M. (2021). Evaluation of water erosion by mapping and application of the PAP/RAC method in the Prerif of Ouazzane. *Ecology, Environnement and Conservation*, 12.
- Najia, F., Mohamed, M., & Brahim, B. (2022). Physico-Chemical Characterization and Evaluation of Soil Structural Stability in the Oued Joumouaa Watershed (Western Prerif). *The Iraqi Geological Journal*, 63-78. <https://doi.org/10.46717/igj.55.2A.5Ms-2022-07-21>
- Ouadjane, Y., Yacine, E. A. A., Benzougagh, B., Nassiri, L., & Ibijbijen, J. 2021. Evaluation Des Risques D'érosion Hydrique Et Cartographie Des Zones Vulnérables Par La Méthode RUSLE Couplée Aux SIG Et À La Télédétection Dans Le Bassin Versant d'Agoudal En Amont De La Vallée d'Imilchil (Haut Atlas Central, Maroc). *European Scientific Journal*, 17(21), 66-91.
- Ouchen, I., Benzougagh, B., Mastere, M., El Brahimi, M., Fadhil Al-Quraishi, A.M. (2024). Exploring the Interconnection Between Greenhouse Gas Emissions, Climate Change, and Natural Resource Degradation in the Central Region of Morocco. In: *The Handbook of Environmental Chemistry*. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978_2024_1096
- Ougougdal HA, Khebiza MY, Messouli M, Bounoua L (2020) Delineation of vulnerable areas to water erosion in a mountain region using SDR-InVEST model: a case study of the Ourika watershed, Morocco. *Sci Afric* 10:e00646. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00646>

Évaluation des risques d'érosion de surface et profonde à oued Amtar (Rif, Maroc)

Apport des outils géomatiques et de machine Learning

BIBLIOGRAPHIE

- Ouyang W, Wu Y, Hao Z, Zhang Q, Bu Q, Gao X (2018) Combined impacts of land use and soil property changes on soil erosion in a mollisol area under long-term agricultural development. *Sci Total Environ* 613:798–809. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.173>
- Panagos P, Christos K, Cristiano B, Ioannis G (2014) Seasonal monitoring of soil erosion at regional scale: an application of the G2 model in Crete focusing on agricultural land uses. *Int J Appl Earth Obs Geoinf* 27:147–155. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2013.09.012>
- Pandey S, Kumar P, Zlatic M, Nautiyal R, Panwar VP (2021) Recent advances in assessment of soil erosion vulnerability in a watershed. *Int Soil Water Conserv Res* 9(3):305–318. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.03.001>
- Pereira FC, Donovan M, Smith CM, Charters S, Maxwell TM, Gregorini P (2023) A geospatial modelling approach to understand the spatio-temporal impacts of grazing on soil susceptibility to erosion. *Soil Systems* 7(2):30. <https://doi.org/10.3390/soilsystems7020030>
- Perri F, Martín-Martín M, Maaté A, Hlila R, Maaté S, Criniti S, Critelli S (2022) Provenance and paleogeographic implications for the cenozoic sedimentary cover of the ghomaride complex (Internal Rif Belt), Morocco. *Mar Petrol Geol* 143:105811. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2022.105811>
- Phinzi K, Ngetar NS (2019) The assessment of water-borne erosion at catchment level using GIS-based RUSLE and remote sensing: a review. *Int Soil Water Conserv Res* 7(1):27–46. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2018.12.002>
- Pourghasemi HR, Honarmandnejad F, Rezaei M, Tarazkar MH, Sadhasivam N (2021) Prioritization of water erosion-prone sub-watersheds using three ensemble methods in Qareaghaj catchment, southern Iran. *Environ Sci Pollut Res* 28:37894–37917. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13300-2>
- Rahman MR, Shi ZH, Chongfa C, Dun Z (2015) Assessing soil erosion hazard-a raster-based GIS approach with spatial principal component analysis (SPCA). *Earth Sci Inf* 8:853–865. <https://doi.org/10.1007/s12145-015-0219-1>
- Renard KG, Foster GR, Weesies GA, McCool DK, Yoder DC (1997) Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). US Department of Agriculture, Agriculture Handbook, p 703
- Sakuno NRR, Guiçardi ACF, Spalevic V, Avanzi JC, Silva MLN, Mincato RL (2020) Adaptation and application of the erosion potential method for tropical soils. *Rev Ciência Agron* 51. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20200004>
- Schaefer M, Thinh NX (2019) Evaluation of land

BIBLIOGRAPHIE

- cover change and agricultural protection sites: a GIS and remote sensing approach for Ho Chi Minh City, Vietnam. *Heliyon* 5(5). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01773>
- Senent-Aparicio J, Blanco-Gómez P, López-Ballesteros A, Jimeno-Sáez P, Pérez-Sánchez J (2021) Evaluating the potential of Glofas-era5 river discharge reanalysis data for calibrating the SWAT model in the Grande San Miguel River Basin (El Salvador). *Remote Sens* 13(16):3299. <https://doi.org/10.3390/rs13163299>
- Sestras P, Mircea S, Roşca S, Bilaşco Ş, Sălăgean T, Dragomir LO, Kader S (2023) GIS based soil erosion assessment using the USLE model for efficient land management: a case study in an area with diverse pedo-geomorphological and bioclimatic characteristics. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca* 51(3):13263–13263. <https://doi.org/10.15835/nbha51313263>
- Sharma M, Bangotra P, Gautam AS, Gautam S (2022) Sensitivity of normalized difference vegetation index (NDVI) to land surface temperature, soil moisture and precipitation over district Gautam Buddh Nagar, UP, India. *Stoch Environ Res Risk Assess* 1–11. <https://doi.org/10.1007/s00477-021-02066-1>
- Sharma N, Acharya S, Kumar K, Singh N, Chaurasia OP (2018) Hydroponics as an advanced technique for vegetable production: an overview. *J Soil Water Conserv* 17(4):364–371. <https://doi.org/10.5958/2455-7145.2018.00056.5>
- Singh MC, Sur K, Al-Ansari N, Arya PK, Verma VK, Malik A (2023) GIS integrated RUSLE model-based soil loss estimation and watershed prioritization for land and water conservation aspects. *Front Environ Sci* 11:1136243. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1136243>
- Solaimani K, Modallaldoust S, Lotfi S (2009) Investigation of land use changes on soil erosion process using geographical information system. *Int J Environ Sci Technol* 6:415–424. <https://doi.org/10.1007/BF03326080>
- Spalevic V, Barovic G, Vujacic D, Curovic M, Behzadfar M, Djurovic N, Billi P (2020) The impact of land use changes on soil erosion in the river basin of Miocki Potok, Montenegro. *Water* 12(11):2973. <https://doi.org/10.3390/w12112973>
- Svoray T (2022) Assessments of erosion risk. In: *A geoinformatics approach to water erosion: soil loss and beyond*. Springer International Publishing, Cham, pp 205–263. https://doi.org/10.1007/978-3-030-91536-0_6
- Taj, B., MasTere, M., el Fellah, B., & Benzougagh, B. (2023). Apport de la tomographie de la résistivité électrique (TRE) et approche géotechnique pour la caractérisation des instabilités de terrain: Cas du versant de Jebha, Rif, Nord du Maroc. *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, Section Sciences de la Terre*, (45), 45-59.

BIBLIOGRAPHIE

- Talchabhadel R, Nakagawa H, Kawaike K, Prajapati R (2020) Evaluating the rainfall erosivity (R-factor) from daily rainfall data: an application for assessing climate change impact on soil loss in Westrapti River basin, Nepal. *Model Earth Syst Environ* 6:1741–1762. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00787-w>
- Tangestani MH (2006) Comparison of EPM and PSIAC models in GIS for erosion and sediment yield assessment in a semiarid environment: Afzar Catchment, Fars Province, Iran. *J Asian Earth Sci* 27(5):585–597. <https://doi.org/10.1016/j.jseacs.2005.06.002>
- Tariq M, Akhtar K (2022) Mulching is an approach for a significant decrease in soil erosion. In: *Mulching in agroecosystems: plants, soil & environment*. Springer Nature Singapore, Singapore, pp 59–70. https://doi.org/10.1007/978-981-19-6410-7_4
- Uddin K, Abdul Matin M, Maharjan S (2018) Assessment of land cover change and its impact on changes in soil erosion risk in Nepal. *Sustainability* 10(12):4715. <https://doi.org/10.3390/su10124715>
- Van Huyssteen CW, du Preez CC (2023) Agricultural land degradation in South. Africa. https://doi.org/10.1007/698_2022_922
- Vatandaşlar C, Yavuz M (2023) Useful indicators and models for assessing erosion control ecosystem service in a semi-arid forest landscape. *Environ Monit Assess* 195(1):208. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10814-1>
- Vitale S, Zaghloul MN, El Ouaragli B, Tramparulo FDA, Ciarcia S (2015) Polyphase deformation of the Dorsale Calcaire complex and the maghrebien flysch basin units in the Jebha area (Central Rif, Morocco): new insights into the Miocene tectonic evolution of the Central Rif belt. *J Geodyn* 90:14–31. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2015.07.002>
- Wang J, Zhuan R, Chu L (2019) The occurrence, distribution and degradation of antibiotics by ionizing radiation: an overview. *Sci Total Environ* 646:1385–1397. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.415>
- Wang Y, Zhang J, Chen W, Sun G (2017) Assessment of soil erosion risk and its spatial distribution in the Loess Plateau region of China using the revised universal soil loss equation (RUSLE) and geo-detector. *Sustainability* 9(7):1179
- Wang ZJ, Jiao JY, Rayburg S, Wang QL, Su Y (2016) Soil erosion resistance of “Grain for Green” vegetation types under extreme rainfall conditions on the Loess Plateau, China. *CATENA* 141:109–116. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.02.025>
- Wassie SB (2020) Natural resource degradation tendencies in Ethiopia: a review. *Environ Syst Res* 9(1):1–29. <https://doi.org/10.1186/s40068-020-00194-1>

BIBLIOGRAPHIE

- Wischmeier WH, Smith DD (1978) Predicting rainfall erosion losses—a guide to conservation planning. In: Agriculture handbook, p 537
- Yen H, Park S, Arnold JG, Srinivasan R, Chawanda CJ, Wang R, Zhang X (2019) IPEAT+: A built-in optimization and automatic calibration tool of SWAT+. *Water* 11(8):1681. <https://doi.org/10.3390/w11081681>
- Zachar, D. (1982). Erosion factors and conditions governing soil erosion and erosion processes. In *Soil erosion* (pp. 205–387).
- Zeghmar A, Marouf N, Mokhtari E (2022) Assessment of soil erosion using the GIS-based erosion potential method in the Kebir Rhumel Watershed, Northeast Algeria. *J Water Land Dev* (52). <https://doi.org/10.24425/jwld.2022.140383>
- Zema DA, Nunes JP, Lucas-Borja ME (2020) Improvement of seasonal runoff and soil loss predictions by the MMF (Morgan-Morgan-Finney) model after wildfire and soil treatment in Mediterranean forest ecosystems. *CATENA* 188:104415. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104415>

ANNEXES

Cette thèse de doctorat repose sur une série des publications, résumés dans le tableau ci-dessous :

Publication	Titre	Statut
P1: Article	El Brahimi, M. , Mastere, M., Benzougagh, B. et al. Assessing soil erosion vulnerability through geospatial morphometric analysis in the Oued Amtar Basin (Northwest Morocco). Euro-Mediterr J Environ Integr 9, 1157–1180 (2024). https://doi.org/10.1007/s41207-024-00493-4	Publié
P2: Chapitre	El Brahimi, M. , Benzougagh, B., Mastere, M., Fellah, B. E., Al-Quraishi, A. M. F., Fartas, N., & Khedhe, K. M. (2024). GIS-Based Erosion Potential Method (EPM) for Soil Degradation Evaluation: A Case Study the Northeast of Morocco. In: Al-Quraishi, A.M.F., Mustafa, Y.T. (eds) Natural Resources Deterioration in MENA Region. Earth and Environmental Sciences Library. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-58315-5_8	Publié
P3: Article	El Brahimi, M. , EL Fellah, B., Mastere, M., Benzougagh, B., El Basri, M., Najia, F. (2022). Quantification of Soil Sensitivity to Water Erosion by the RUSLE Model in the Oued Amtar Watershed, NorthWestern Morocco. The Iraqi Geological Journal, 41-56. https://doi.org/10.46717/igi.55.2C.4ms-2022-08-17	Publié
P4: Short article	El Brahimi, M. , Mastere, M., Benzougagh, B., Fellah, B., Fartas, N. (2024). Évaluation de l'analyse morphométriques et hypsométrique du bassin de l'oued Amtar, à l'aide des SIG et Télédétection. Colloque international sur les risques hydroclimatiques et géomorphologiques : typologie, cartographie et gestion. Oujda, les 17, 18 et 19 mai 2024. ISBN:978-9954-689-67-7	Publié
P5: Article	El Brahimi, M. , Benzougagh, B., EL Fellah, B., Mastere, M., Sbihi, A., Najia, F. (2024). Mapping landslide susceptibility in the Oued Amtar watershed using machine learning models (LR, RF and SVM).	Soumis
P6: Article	El Brahimi, M. , Benzougagh, B., EL Fellah, B., Mastere, M., Soilihi, A., Najia, F. (2024). Optimizing Flood Susceptibility Assessment using Ensemble Algorithms: A case study of Oued Amtar watershed (Rif-Morocco).	Soumis
P7: Chapitre	Brahim Benzougagh, Ayad M. Fadhil Al-Quraishi, Youssef Bammou, Shuraik Kader, Mohammed El Brahimi , Driss Sadkaoui, and Latifa Ladel(2024). Spectral Angle Mapper Approach (SAM) for Land Degradation Mapping: A Case Study of the Oued Lahdar Watershed in the Pre-Rif Region (Morocco)	Publié
P8: Article	Najia Fartas, Bouchta El Fellah, Mohamed Mastere, Brahim Benzougagh and Mohammed El Brahimi (2022). Physico-Chemical Characterization and Evaluation of Soil Structural Stability in the Oued Joumouaa Watershed (Western Prerif)	Publié
P9: Article	Najia Fartas, Bouchta El Fellah, Mohamed Mastere, Brahim Benzougagh, Mohammed El Brahimi (2022). Potential Soil Erosion Modeled with RUSLE Approach and Geospatial Techniques (GIS Tools and Remote Sensing) in Oued Joumouaa Watershed (Western Prerif-Morocco)	Publié
P10: Chapitre	Ibrahim Ouchen, Brahim Benzougagh, Mohamed Mastere, Mohammed El Brahimi & Ayad M. Fadhil Al-Quraishi (2024). Exploring the Interconnection Between Greenhouse Gas Emissions, Climate Change, and Natural Resource Degradation in the Central Region of Morocco Link .	Publié



Quantification of Soil Sensitivity to Water Erosion by the RUSLE Model in the Oued Amter Watershed, Northwestern Morocco

Mohammed El Brahimi^{1,*}, Bouchta El Fellah¹, Mohamed Mastere¹, Brahim Benzougagh¹, Mohamed El Basri¹ and Najia Fartas¹

¹ Geophysics and Natural Hazards Laboratory, Scientific Institute; Geophysics, Natural Patrimony and Green Chemistry Research Center "GEO-PAC", Mohammed-V University in Rabat, Avenue Ibn Battouta, P.B 703, 10106 Rabat-City, Morocco.

* Correspondence: elbrahimi.mohammed@gmail.com

Abstract

Received:
12 May 2022

Accepted:
14 June 2022

Published:
30 September 2022

The present study aims to estimate the soil losses in the watershed of Oued Amter extends the length of the internal Rifain domain, located in the region of Tangier-Tetouan-Al Houceima, Chefchaouen province in north-western Morocco. The spatialization of the empirical model was based on the integration of five factors in the Geographic Information System, namely, rainfall erosivity, soil erodibility, vegetation cover, topography and anti-erosion practices, and whose superposition allowed the elaboration of the quantitative map of soil losses at the watershed scale. The Oued Amter watershed covers an area of 300 km²; it is elongated with an altitude ranging from 0 m to 2100 m from north to south and a slope that varies from 0 to 58.58%. The rainfall study of the climatic stations located near the watershed has shown the irregularity of rainfall in time and space. The erosivity factor R presented values ranging from 1637.09 to 1937.61, with an average of 1787.35 MJ.mm/ha.h.an (Millijoule. Millimeters/hectare. Hour. Year). The erodibility factor K presents values from 0.139 to 0.140 and it showed that the soils little evolved and the Vertisols are the most vulnerable to erosion.

Keywords: Oued Amter; Watershed; Water erosion; RUSLE Model; Soil sensitivity

1. Introduction

The Water erosion is a process that expresses itself through soil degradation. It threatens a large surface on a global scale and describes the phenomena due to man and/or climatic aggressiveness that reduces the production potential of soils and the quality of natural resources. It is the first manifestation of the phenomenon of desertification and is mainly focused in regions with a semi-arid climate and in the Mediterranean areas. Water erosion is considered an important phenomenon affecting the environment. It has negative consequences on the socio-economic framework at the local, regional and national level, in a general way, because of the demographic growth and also the climatic changes. It constitutes a danger on the infrastructures, on the agricultural productions and also on the quality of the waters.

A study on soil degradation in Morocco, carried out by the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), showed the extent of this phenomenon with a value of 12.6 million hectares of crops and rangelands that were considered to be under threat (Zouagui et al., 2018). Another more

DOI: [10.46717/igi.55.2C.4ms-2022-08-17](https://doi.org/10.46717/igi.55.2C.4ms-2022-08-17)



Assessing soil erosion vulnerability through geospatial morphometric analysis in the Oued Amter Basin (Northwest Morocco)

Mohammed El Brahimi¹ · Mohamed Mastere¹ · Brahim Benzougagh¹ · Bouchta El Fellah¹ · Najia Fartas¹ · Latifa Ladel¹ · Ayyoub Sbihi¹ · Benson Turyasingura² · Saleh Alsulamy³ · Khaled Mohamed Khedher⁴ · Ahmed Ali A. Shohan³ · Mohamed Abdelaziz Salem⁵ · Ayed Eid Alluqmani⁶

Received: 18 November 2023 / Accepted: 14 February 2024
© Springer Nature Switzerland AG 2024

Abstract

Sustainable development is threatened by soil erosion. Since it takes over 300 years for a centimeter of soil to form, preventing soil erosion is essential to safeguarding priceless resources. In any hydrological analysis, morphometric analysis is a relevant scientific method that is essential to the development and management of drainage basins. The main objectives of this study were (i) to analyze the morphometric parameters of the Oued Amter Basin using geographic information systems (GIS) and remote sensing (RS) (geospatial tools) and (ii) to prioritize sub-basins and identify the major morphometric parameters that influence soil erosion in the Oued Amter Basin. Morphometric analysis of the Oued Amter Basin (300 km²) was performed to prioritize sub-basins based on their susceptibility to erosion by water using geospatial tools (remote-sensing-based data and a GIS). The linear, relief, and shape morphometric parameters of the drainage network were calculated using data from the Advanced Land Observing Satellite (ALOS) phased-array L-type synthetic-aperture radar (PALSAR) digital elevation model (DEM) with a spatial resolution of 12.5 m. These parameters revealed the network's texture, morpho-tectonics, geometry, and relief characteristics (including stream length (Lu) and mean stream length (Lsm), stream length ratio (RL), bifurcation ratio (Rb), average bifurcation ratio (RBM), drainage density (Dd), drainage texture (T), flow frequency (Fs), elongation rate (Re), circularity ratio (Rc), form factor (Ff), relief, and relief ratio). Using the array of compound (Cp) values that were computed, we set the priority ranks and divided the sub-watershed into four priority-rank groups: (i) low, which represents 5% of the basin surface; (ii) moderate, which represents 30%; (iii) high, which represents 35%; and (iv) extremely high, which represents 30% of the basin surface. The results show that this classification is valuable for prioritizing and planning interventions focused on addressing soil erosion and mitigating natural hazard risks within the watershed. The method tested here has been shown to be an effective tool to improve sustainable soil management.

Keywords Amter watershed (Morocco) · Morphometric analysis · Prioritization sub-catchments · Remote sensing and GIS geoprocessing · Soil erosion · Natural hazard risks

Abbreviations

A	Area of basin	Ff	Form factor
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer	Fs	Stream frequency
C	Channel maintenance constant	GIS	Geographic information system
Cc	Compactness coefficient	If	Infiltration number
Cp	Compound values	km	Kilometers
Dd	Drainage density	km ²	Square kilometers
DEM	Digital elevation model	Lg	Length of overland flow
Dt	Drainage texture	Lu	Stream length
		Lsm	Mean stream length
		N	North
		Nu	Stream number
		P	Perimeter of basin
		QGIS	Quantum GIS
		Rc	Circularity ratio

Responsible Editor: João Miguel Dias.

Extended author information available on the last page of the article

Published online: 02 May 2024



GIS-Based Erosion Potential Method (EPM) for Soil Degradation Evaluation: A Case Study the Northeast of Morocco



Mohammed El Brahimi, Brahim Benzougagh , Mohamed Mastere, Bouchta El Fellah, Ayad M. Fadhil Al-Quraishi , Najia Fartas, and Khaled Mohamed Khedhe

Abstract Soil degradation is a significant environmental concern, posing severe challenges to sustainable agriculture and land management. The Northeast region of Morocco is particularly susceptible to soil erosion, owing to a combination of factors, including topography, geomorphology, geology, climate, and land use practices. This chapter introduces a GIS-based Erosion Potential Method (EPM) designed to assess soil degradation in the Oued Amter watershed in Northeast Morocco. This study developed a comprehensive erosion risk assessment model by integrating various spatial data, such as topography, rainfall, land cover, and soil properties. The results of this study reveal that soil loss varies significantly, ranging from 55.91 to 44,088.33 m³/km²/year across the Oued Amter watershed. These findings

M. El Brahimi · B. Benzougagh (✉) · M. Mastere · B. E. Fellah · N. Fartas
Geophysics and Natural Hazards Laboratory, Department of Geomorphology and Geomatics (D2G), Scientific Institute, Mohammed V University in Rabat, Avenue Ibn Batouta, Agdal, PO Box 703, 10106 Rabat-City, Morocco
e-mail: brahim.benzougagh@is.um5.ac.ma

M. El Brahimi
e-mail: mohammed_elbrahimi2@um5.ac.ma

M. Mastere
e-mail: mohamed.mastere@is.um5.ac.ma

B. E. Fellah
e-mail: bouchta.elhellah@um5.ac.ma

N. Fartas
e-mail: najia_fartas@um5.ac.ma

A. M. F. Al-Quraishi
Petroleum and Mining Engineering Department, Faculty of Engineering, Tishk International University, Erbil 44001, Kurdistan Region, Iraq
e-mail: ayad.alquraishi@tiu.edu.iq; ayad.alquraishi@gmail.com

K. M. Khedhe
Department of Civil Engineering, College of Engineering, King Khalid University, Abha 61421, Saudi Arabia
e-mail: kkhedher@kku.edu.sa

© The Author(s), under exclusive license to Springer Nature Switzerland AG 2024
A. M. F. Al-Quraishi and Y. T. Mustafa (eds.), *Natural Resources Deterioration in MENA Region*, Earth and Environmental Sciences Library,
https://doi.org/10.1007/978-3-031-58315-5_8

135

Spectral Angle Mapper Approach (SAM) for Land Degradation Mapping: A Case Study of the Oued Lahdar Watershed in the Pre-Rif Region (Morocco)



Brahim Benzougagh , Ayad M. Fadhil Al-Quraishi , Youssef Bammou, Shuraik Kader, Mohammed El Brahimi, Driss Sadkaoui, and Latifa Ladel

Abstract Land degradation is a complex and widespread environmental issue with significant implications for global sustainability. It encompasses various processes that negatively impact soil health and support productive ecosystems and human livelihoods. This chapter focused on mapping land use/land cover (LULC) and

B. Benzougagh (✉) · M. El Brahimi · L. Ladel
Geophysics and Natural Hazards Laboratory, Department of Geomorphology and Geomatics (D2G), Scientific Institute, Mohammed V University in Rabat, Avenue Ibn Batouta, Agdal, P.O. Box 703, 10106 Rabat City, Morocco
e-mail: brahim.benzougagh@is.um5.ac.ma

M. El Brahimi
e-mail: mohammed_elbrahimi2@um5.ac.ma

L. Ladel
e-mail: latifa_ladel@um5.ac.ma

A. M. F. Al-Quraishi
Petroleum and Mining Engineering Department, Tishk International University, Erbil 44001, Iraq
e-mail: ayad.alquraishi@tiu.edu.iq; ayad.alquraishi@gmail.com

Y. Bammou
Department of Geology, Faculty of Science and Technology, Laboratory of Geo-Resources, Geo-Environment and Civil Engineering (L3G), Cadi Ayad University, Marrakech, Morocco
e-mail: youssef.bammou@ced.uca.ma

S. Kader
School of Engineering and Built Environment, Griffith University, Nathan, QLD 4111, Australia
Green Infrastructure Research Labs (GIRLS), Cities Research Institute, Griffith University, Gold Coast, QLD 4215, Australia

S. Kader
e-mail: shuraik.mohamedabdulkader@griffithuni.edu.au

D. Sadkaoui
Laboratory for Applied and Marine Geosciences, Geotechnics and Geohazards (LR3G), Department of Geology, Faculty of Sciences, University Abdelamlek Essaâdi, Tetouan, Morocco
e-mail: d.sadkaoui@uae.ac.ma

© The Author(s), under exclusive license to Springer Nature Switzerland AG 2024
A. M. F. Al-Quraishi and Y. T. Mustafa (eds.), *Natural Resources Deterioration in MENA Region*, Earth and Environmental Sciences Library,
https://doi.org/10.1007/978-3-031-58315-5_2

15

identifying land degradation features using Sentinel-2 imagery and the Spectral Angle Mapper (SAM) approach. The primary objective was to gain insight into the spatial distribution of land degradation within the study area. The step-by-step supervised classification process involved data preparation, training data collection, feature selection, SAM classification, and post-classification processing. An accuracy assessment was conducted to validate the results and ensure the reliability of the land cover map. As a result of the different LULC classifications in the research area, the arboriculture class represented 18% of the study area. In contrast, the agriculture class showed coverage of 27%, followed by the forest class occupying 22% of the catchment area, and the bare soil class representing 33% of the total study area. The combination of substantial proportions of bare soil (33%) and agriculture (27%) suggested that a large portion of the landscape may be susceptible to land degradation if appropriate measures are not implemented. The derived LULC map is a valuable resource for environmental monitoring, ecosystem conservation, and land use planning. Policymakers, researchers, and stakeholders can use this information to make informed decisions for sustainable land management, protect natural resources, and mitigate the impact of land degradation.

Keywords Land degradation • Spectral angle mapper • Pre-Rif Morocco • LULC • Lahdar Watershed

1 Introduction

The earth's land is a necessary resource for humans because it enables more than 7.5 billion people living there to eat every day, but it is also a limited resource because there are currently only 33 million km² (or 6.4% of the earth's surface) that can be used for agriculture (Farah et al. 2021; Bammou et al. 2023). Land degradation is one of the most important and persistent environmental issues the Earth has long faced (Fadhil 2009; Ganasri and Ramesh 2016; Rawat et al. 2016; Benzougagh and Fellah 2023). Land degradation is a complex and widespread environmental issue with significant implications for global sustainability. It encompasses various processes that negatively impact soil health and its ability to support productive ecosystems and human livelihoods (Hossain et al. 2020; Benzougagh et al. 2022). Land degradation affects the vast expanses of the Earth's land surface, resulting in reduced crop yields, increased vulnerability to erosion, loss of biodiversity, and diminished ecosystem services (Eswaran et al. 2001; UNCCD 2017; Hossini et al. 2022). The Food and Agriculture Organization (FAO) has estimated that approximately 24% of the global land area is already somewhat degraded, and an additional 8% is at risk of degradation (FAO 2015). Moreover, it is estimated that land degradation costs the global economy by approximately 10% of the annual gross product (GDP) through the loss of ecosystem services and reduced agricultural productivity (Costanza et al. 2014; Sestras et al. 2023).



Iraqi Geological Journal

Journal homepage: <https://www.igi-iraq.org>



Physico-Chemical Characterization and Evaluation of Soil Structural Stability in the Oued Joumouaa Watershed (Western Prerif)

Najia Fartas^{1,*}, Bouchta El Fellah¹, Mohamed Mastere¹, Brahim Benzougagh¹ and Mohammed El Brahimi¹

¹ Geophysics and Natural Hazards Laboratory, Scientific Institute; Geophysics, Natural Patrimony and Green Chemistry Research Center "GEOPAC", Mohammed-V University in Rabat, Avenue Ibn Battouta, Rabat-City, Morocco

* Correspondence: najiafartas@gmail.com

Abstract

Received:
27 March 2022

Accepted:
27 April 2022

Published:
31 July 2022

Soil degradation leads to alteration of ecological and economic functions due to a decrease in productivity and quality of the soil. The aim of the present study was to assess soil degradation by identifying physico-chemical soil factors in order to identify soil properties that could be used as indicators for future soil quality conservation programs and their relationship with soil erosion risk in the Oued Joumouaa watershed. Soil samples from three locations with, on average, from 0 to 20 cm depth, distributed on three stations, in a random way. Using discriminant and factor analyses, principal soil factors were identified. The results of the physico-chemical analyses (texture, pH, organic matter, calcium carbonate, assimilable phosphorus, exchangeable potassium, structural stability), show that the soils have silty-clayey-sandy textures, moderately basic pH (7.8 to 8), carbonate rate which varies from (16.86 to 20.36). The organic matter varies from 1.73 to 3.94. The assimilable phosphorus varies from 13.46 to 14.85, The structural stability of these soils under water revealed that they are generally unstable, with average weight diameters ranging from 0.56 (station 1) to 1.1 (station 2) and 1 (station 3). Therefore, it is suggested that the present study can be applied to projects with special relevance to soil scientists, environmental scientists and planning agencies that can use the present study as baseline data to combat land degradation and conserve land resources in an efficient manner.

Keywords: Watershed; Oued Joumouaa; Physico-chemical analyses; Texture; Structural Stability

1. Introduction

Soil is one of the most important resources of the nature, it is not only important for agriculture but also have more useful for living organisms (Ku, 2015). Understanding of soil chemical reaction and processes is vital for developing innovative resource management strategies, and understanding and adaptable the performance of the terrestrial ecosystem at regional and global scale (Schnitzer, 1986). Everyone is affected by soil, whether directly or indirectly. It is a fragile ecosystem and a natural body on which agriculture products thrive (Sinha and Shrivastav, 2000). Agricultural soils under erosion, overgrazing, intensification and the use of working tools, experience a significant degradation that affects the biological, physical and chemical parameters of soil quality. Soil degradation is a significant topic of global climate change, which contributes directly to the sustainability of the ecological

DOI: [10.46717/igi.55.2A.5Ms-2022-07-21](https://doi.org/10.46717/igi.55.2A.5Ms-2022-07-21)



Iraqi Geological Journal

Journal homepage: <https://www.igi-iraq.org>



Potential Soil Erosion Modeled with RUSLE Approach and Geospatial Techniques (GIS Tools and Remote Sensing) in Oued Joumouaa Watershed (Western Prerif-Morocco)

Najia Fartas^{1,*}, Bouchta El Fellah¹, Mohamed Mastere¹, Brahim Benzougagh¹, Mohammed El Brahimi¹

¹ Geophysics and Natural Hazards Laboratory, Scientific Institute; Geophysics, Natural Patrimony and Green Chemistry Research Center "GEOPAC", Mohammed-V University in Rabat, Avenue Ibn Battouta, Rabat, Morocco

* Correspondence: najiafartas@gmail.com

Abstract

Received:
7 April 2022

Accepted:
28 May 2022

Published:
31 August 2022

Water erosion is a complicated phenomenon that contributes to soil degradation and is linked to natural and anthropogenic causes that are difficult to manage in time and space. It has a significant impact on our country and necessitates a number of studies and efforts to prevent and manage it. Geospatial approaches (GIS tools and remote sensing (RS) data) were used to test the RUSLE strategy in the Joumouaa watershed, where it was found to be accurate. The latter is a mountainous range with a 60 km² area that is part of the Western Prerif and in the Teroual region (northern Morocco). The proposed technique integrates the RUSLE for calculating erosion with geospatial techniques for detecting variables that cause water erosion and soil loss. The erosivity factor R had a range of values, with an average of 1832.76 to 1968.87. It was shown that soils had an erodibility factor k of 0.016 to 0.0245, which indicates that they are the most vulnerable. With the upstream being rougher and more sensitive, the LS factor ranged from 0 and more than 43%. According to the nature of the land, there are different C factors. Water erosion affects all regions of the basin to varying degrees, depending on the processes that cause erosion. The results show that the soils in the Joumouaa watershed are medium to highly erodible, with maximum erodibility ranging from 50 to 280 t/h/year, a sparse plant covers with little protection, and moderate to high climatic aggressiveness. An understanding of the danger of soil erosion may be gained from this study, as well as a guide for land management techniques and land planning that can be used to construct a decision support tool in terms of natural resource management.

Keywords: Soil erosion; RUSLE model; Geospatial techniques; Joumouaa watershed; Erodibility

1. Introduction

Water erosion is a damaging phenomenon to the ecosystem in general. On several scales, it has detrimental effects on the socio-economic framework (national, regional, local). It has a negative impact on natural resources, agricultural production, water quality, and infrastructure, among other things (Benzougagh, 2020; 2022). According to research conducted by the United Nations Food Organization (FAO), deteriorated soils cover 12.6 million hectares of cropland and rangeland in Morocco (Zouagui

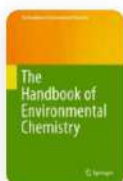
DOI: [10.46717/igi.55.2B.5Ms-2022-08-21](https://doi.org/10.46717/igi.55.2B.5Ms-2022-08-21)

[Home](#) > Chapter

Exploring the Interconnection Between Greenhouse Gas Emissions, Climate Change, and Natural Resource Degradation in the Central Region of Morocco

| Chapter | First Online: 30 July 2024

| pp 1–18 | [Cite this chapter](#)



The Handbook of Environmental Chemistry

[Ibrahim Ouchen](#), [Brahim Benzougagh](#) , [Mohamed Mastere](#), [Mohammed El Brahimi](#) & [Ayad M. Fadhil Al-Quraishi](#)

 Part of the book series: [The Handbook of Environmental Chemistry](#)

 1 [Altmetric](#)

Abstract

Climate change presents a significant challenge in Morocco, where the difficult dynamics of greenhouse gas emissions, meteorological variability, and natural resource degradation intersect. This study offers a comprehensive analysis of these interconnected

https://link.springer.com/chapter/10.1007/698_2024_1096

1/11

phenomena, drawing on the multidisciplinary knowledge of climate science, environmental research, and resource management. Using a diverse dataset, including temperature and precipitation data, remote sensing images, and greenhouse gas measurements, we examined the spatiotemporal evolution of climate variables over the past century. Our results showed a complex pattern of temperature fluctuations and precipitation trends, with remarkable increases in maximum and minimum temperatures and a perceptible decline in precipitation over the observation period. In addition, our assessment of greenhouse gas concentrations, particularly CO₂ and CH₄, highlights the importance of atmospheric monitoring to understand the dynamics of meteorological exchanges. Continuous measurements from the Atlas Mohammed V Observatory show high seasonal and interannual variability, with an observed increase in CO₂ and CH₄ concentrations over the last five years. This study also highlights the significant effects of climate change on land degradation, deforestation, and soil erosion. Rising temperatures and changing rainfall patterns exacerbate environmental pressures, disrupting ecosystems and compromising socioeconomic resilience.

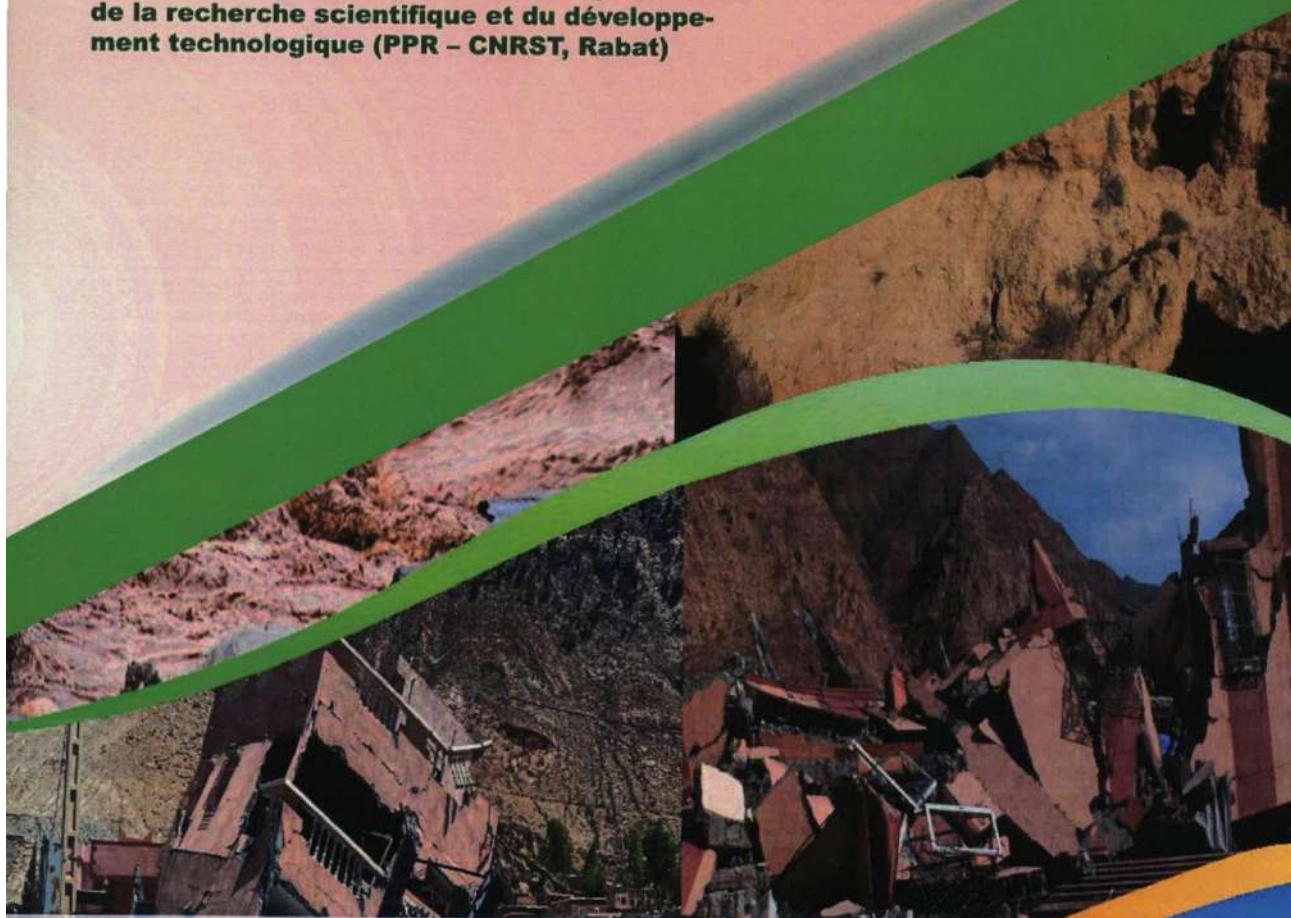


ACTES DU COLLOQUE INTERNATIONAL

**"LES RISQUES HYDROCLIMATIQUES ET GÉOMORPHOLOGIQUES :
TYPOLOGIE, CARTOGRAPHIE ET GESTION"**

CLÔTURE DU PROJET PPR

financé dans le cadre des domaines prioritaires
de la recherche scientifique et du développe-
ment technologique (PPR – CNRST, Rabat)



Ouvrage coordonné par
le Professeur Abdelkader SBAI
Publications de la Faculté des Lettres et Sciences
humaines – Oujda, 2024
211 / 2024
Série : Colloques et séminaires : 92 / 2024

ISBN : 978-9954-689-67-7

Cet ouvrage propose les principales communications présentées
lors du Colloque International sur
les risques hydroclimatiques et géomorphologiques: typologie, cartographie et gestion
organisé à la Faculté des lettres et Sciences Humaines d'Oujda, les 14 et 15 juin 2022

Comité d'organisation

AMGHAR Ahmed (FLSH, Oujda)	GAUCHE Evelyne (Université de Tours)
BAHKAN Mimoun (Commune d'Arekmane)	GHZAL Mohamed (FLSH, Oujda)
BENRBIA Khadija (FLSH, Oujda)	LAAOUANE Mohamed (FLSH, Fès Sais)
BOUSLAM Mohamed (FLSH, Oujda)	MOUADILI Omar (FLSH, Oujda)
CANTON Maria Yolanda (Université d'Almería)	SABRI Mohamed (FLSH, Oujda)
DELLAL Mohamed (FLSH, Oujda)	SBAI Abdelkader (FLSH, Oujda)
EL BAYE Allal (FLSH, Oujda)	SOLE-BENET Albert (C.S.I.C.) Almeria
EL GHALBI Khallaf (FLSH, Oujda)	TAOUS Ali (FLSH, Fès Sais)
EL HARRADJI Abderrahmane (FLSH, Oujda)	TRIBAK Abdellatif (FLSH, Fès Sais)

Comité scientifique

ABAHROUR Mohammed (Fac polydisc. Taza)	EL HAFID Driss (CRMEF, Oujda)
ADOUK Nasraddine (Univ. Chouaib Doukkali, El Jadida)	EL HARRADJI Abderrahmane (UMP, Oujda)
AMRAOUI Leila (Université Ibn Zohr, Agadir)	EL HAWARI Abdelghani (Univ. SMBA, Fès)
AMYAY Mhamed (Univ. SMBA, Sais- Fès)	EL HAWARI Jawad (Fac polydisciplinaire, Taza)
BAHOU Abdelaziz (Université Mohamed V, Rabat)	ELBAYE Allal (Université Mohammed Ier, Oujda)
BALLALI Lahcen (Inst. Sup. Prof. Inf. Tech. Santé de Guelmim)	ELGHACHI Mohamed (U. Sultan M. Slimane, Béni.Mellal)
BENATA Mohamed (ESCO, Oujda)	ESSADDEK Abdelhak (Université Mohammed Ier, Oujda)
BENRBIA Khadija (Université Mohammed Ier, Oujda)	GHAZI Abdelkhalek (Université Ibn Tofail, Kénitra)
BENTALEB Aziz (Université Mohamed V, Rabat)	GHZAL Mohamed (Université Mohammed Ier, Oujda)
BENZOUGAGH (Université Mohamed V, Rabat)	HADDOUTI Khalid ((Université Mohammed Ier, Oujda)
BOUBRIA Abdelouahid (Fac polydisc. Taza)	HANCHAN (Université SMBA, Fès)
BOUGHABA ABDESSALEM (Univ., Tétouan)	LAAOUANE Mohamed (Univ. SMBA, Fès)
BOUKHIDOUS Mimoun (Univ. Mohammed Ier, Oujda)	LABHAR Mohamed (Univ. SMBA, Dhar El Mahraz, Fès)
BYOU Taoufik (Université Mohammed Ier, Oujda)	MACHOURI Nadia (Université Mohamed V, Rabat)
CHAAOUAN Jamal (Fac polydisc. Taza)	MOUHIDDINE Mohamed (Université Hassan II, Casa)
CHAKER Miloud (Université Mohamed V, Rabat)	OUAHMANE Brahim (Université Ibn Zohr, Agadir)
DAIBOUN TOUHAMI (Université Ibn Tofail, Kénitra)	SBAI Abdelkader (Université Mohammed Ier, Oujda)
DELLAL Mohamed (Université Mohammed Ier, Oujda)	SEHLI Abdelaziz (Université Mohammed Ier, Oujda)
EL BOUZIDI Aissa (Université Ibn Tofail, Kénitra)	TAOUS Ali (Univ. SMBA, Sais- Fès)
EL FILALI Abdelhakim (U. Sultan M. Slimane, Khouribga)	TRIBAK Abdellatif (Univ. SMBA, Fès)
EL GHALBI Khallaf (Université Moulay Smail, Meknès)	

Les textes publiés dans cet ouvrage n'engagent que la responsabilité de leurs auteurs

ÉVALUATION DE L'ANALYSE MORPHOMETRIQUE ET HYPSONETRIQUE DU BASSIN DE L'OUED AMTER (NORD-OUEST MAROC) A L'AIDE DE TECHNIQUES DE TELEDETECTION ET DE SYSTEMES D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE

Mohammed EL BRAHIMI ¹, Mohamed MASTERE ¹, Brahim BENZOUAGH ¹, Bouchta EL FELLAH ¹ et Najia FARTAS¹

1- Laboratoire de Géophysique et Risques Naturels (LGRN), Département de Géomorphologie et Géomatique (D2G), Institut scientifique, Université Mohammed V de Rabat, Avenue Ibn Batouta, Agdal, PO Box 703, 10106, Rabat-City, Maroc. *Elbrahimi.mohammed@gmail.com*

RESUME : Cet article vise à évaluer l'applicabilité des paramètres morphométriques (linéaires et surfaciques) pour l'évolution et la gestion des bassins versants. Dans la présente étude, le bassin versant d'Oued Amter (longueur du cours principal de 34,88 km, bassin de 300 km²), a été choisi comme zone d'étude. L'identification des zones à risque d'érosion et la priorisation des 20 sous-bassins versants ont été effectuées en utilisant les paramètres linéaires, topographiques et surfaciques. La recherche a été menée en utilisant les données spatiales du système d'information géographique (SIG). Pour atteindre les objectifs de base, plusieurs paramètres morphométriques ont été calculés, notamment la longueur du flux (Lu) et sa longueur moyenne (Lsm), le rapport de longueur du flux (RL), le ratio de bifurcation (Rb), le rapport de bifurcation moyen (RBM), la densité de drainage (Dd), la texture du drainage (T), la fréquence du flux (Fs), le taux d'allongement (Re), le rapport de circularité (Rc), le facteur de forme (Ff), le relief et le ratio de relief...

L'ensemble des valeurs composées (Cp) calculées nous permet d'établir les rangs de priorité et de classer les sous-bassins versants en trois catégories de priorisation : la catégorie élevée (SBV01, SBV02, SBV03, SBV04, SBV05, SBV06, SBV07, SBV08, SBV15, SBV19 et SBV20), est sujette à une érosion maximale du sol, ce qui nécessite une intervention immédiate pour éviter les risques naturels possibles, La catégorie moyenne (SBV10, SBV11, SBV14, SBV17 et SBV18) et la catégorie faible (SBV09, SBV12, SBV13, SBV16).

Ces analyses morphométriques peuvent donc être utilisées comme un estimateur de l'état d'érosion des bassins versants afin de hiérarchiser les initiatives de conservation des terres et de l'eau ainsi que la gestion des ressources naturelles.

Mots-clés : Morphométrie - Hiérarchisation - Erosion des sols, Oued Amter.

EVALUATION OF THE MORPHOMETRIC AND HYPSONETRIC ANALYSIS OF THE OUED AMTER (NORTH-WEST MOROCCO) BASIN USING REMOTE SENSING TECHNIQUES AND GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS

ABSTRACT: This article aims to assess the applicability of morphometric parameters (linear and surface) for the evolution and management of watersheds. In the present study, the Oued Amter watershed (with a main course length of 34.8871km and a basin area of 300km²) was chosen as the study area, The identification of erosion risk areas and the prioritization of 20 sub-watersheds were carried out using linear, relief and surface area parameters. The research was conducted using spatial data from the Geographic Information System. To achieve the basic objectives, several morphometric parameters were calculated: stream length (Lu) and mean stream length (Lsm), stream length ratio (RL), bifurcation ratio (Rb), average bifurcation ratio (RBM), drainage density (Dd), drainage texture (T), flow frequency (Fs), elongation rate (Re), circularity ratio (Rc), form factor (Ff), relief and relief ratio. .

All the composite values (Cp) calculated enable us to establish priority rankings and classify sub-watersheds into three prioritization categories: the high category (SBV01, SBV02, SBV03, SBV04, SBV05, SBV06, SBV07, SBV08, SBV15, SBV19 and SBV20), subject to maximum soil erosion, requiring immediate intervention to avoid possible natural hazards, the medium