

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Ferhat Abbas, Sétif 1
Institut d'Architecture et des Sciences de la Terre
Département des Sciences de la Terre
Unité de Recherche en Matériaux Emergents



Thèse de Doctorat 3^{ème} cycle (LMD)

Domaine : Sciences de la terre

Filière : Géologie

Spécialité : Géologie de L'ingénieur et Géotechnique

Thème

**Etude de la susceptibilité des sols à l'érosion dans la
région de Bordj–Bou–Arreridj : Approche par SIG**

Présentée par :

DRID Ilhem

Soutenue le : 18.02.2024, devant le jury composé de :

Zahri Farid	MCA, Université Ferhat Abbas, Sétif1	Président
Achour Yacine	MCA, Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi, BBA	Directeur de Thèse
Zighmi Karim	MCA, Université Ferhat Abbas, Sétif1	Co-directeur de Thèse
Hadji Riheb	Pr, Université Ferhat Abbas, Sétif1	Examineur
Boumezbeur Abderrahmane	Pr, Université Oum El Bouaghi	Examineur
Ghrieb Lassaad	Pr, Université Guelma	Examineur

Année universitaire : 2023–2024

تخرجت وأهم الأشياء هي أن أهدي تخرجي إلى من حصد الأشواك عن دربي ليمهد طريق العلم لي والذي العزيز وإلى من أرضعتني الحب والحنان ويلبسم الشفاء والدتي الحبيبة، إلى القلوب الرقيقة والنفوس البريئة أخواتي الغاليات على قلبي وأخي نور عيني وزجي رفيق دربي فشكراً من القلب لكم جميعاً.

J'ai obtenu mon diplôme et le plus important pour moi est de dédier ce succès à ceux qui ont enlevé les obstacles de mon chemin pour me préparer le chemin de la connaissance. À mon cher père, et à celle qui m'a nourri d'amour et de tendresse, ma chère mère. À mes sœurs au cœur tendre et aux âmes innocentes, très chères à mon cœur, et à mon frère, la lumière de mes yeux. À mon mari, mon compagnon de vie. Merci du fond du cœur à vous tous.

Remerciements

La réalisation de cette thèse a été rendue possible grâce à l'aide de nombreuses personnes que je tiens à remercier sincèrement. Avant tout, je souhaite exprimer ma gratitude envers ALLAH^{ﺍﻟﻠﻪ}, qui m'a soutenue et m'a donné le courage et la patience nécessaires tout au long de ces cinq années de recherche.

Je tiens à remercier particulièrement mon directeur de thèse, M. Yacine Achour, d'avoir accepté de superviser ce travail. Je lui suis également reconnaissante pour la confiance qu'il m'a accordée tout au long de ces années, pour sa gentillesse et sa grande patience. Je ne pourrai jamais assez le remercier pour le temps qu'il a consacré à la relecture patiente et toujours pertinente de textes souvent inachevés.

Un grand merci à mon co-directeur, M. Karim Zighmi, pour son soutien et sa bienveillance. Ses commentaires judicieux ont grandement contribué à l'amélioration de la qualité de mon travail.

Je tiens également à remercier les membres du jury qui ont participé à l'examen et à l'évaluation de ce travail, le professeur Riheb Hadji – Université Sétif 1, le professeur Boumezbeur Abderrahmane – Université Oum Bouaghi, et le professeur Ghrieb Lassaad – Université Guelma.

J'exprime ma gratitude à Monsieur Oussama Khababa, Directeur de l'EURL Best Engineering Khababa (Bordj Bou Arreridj), société de conseil technique, de supervision de chantier et d'ingénierie multidisciplinaire, nous le remercions de nous avoir fourni des récepteurs GNSS pour réaliser les travaux de terrain.

J'adresse également mes remerciements aux étudiants Thamer Nouioua, Samra Rahmani, Oumelkheir Ouadfel, et Bachir Atoui, pour leur aide dans le travail sur le terrain.

Je n'oublie pas de remercier tous mes professeurs du niveau primaire jusqu'au niveau universitaire.

Je souhaite également exprimer ma gratitude envers tous mes professeurs du département de géologie de l'Université Ferhat Abbas Sétif 1 et l'Université de Tébessa. Leurs précieux enseignements et conseils ont été d'une grande aide tout au long de mon parcours académique.

Je tiens également à remercier les nombreux lecteurs patients qui ont parcouru les différentes versions des chapitres de cette thèse, écrite dans une langue qui n'est pas ma langue maternelle, et plus particulièrement M. Ben Mohamed.

Mes remerciements les plus sincères vont à mes amis, qui sont devenus ma deuxième famille et qui ont toujours cru en moi, même dans les moments de doute. Leur soutien inébranlable m'a poussé à rester concentré sur mon objectif final et à persévérer jusqu'au bout. Un grand merci à Hasna Aouati et Ikram Madoui, ainsi qu'à mes collègues Seif, Nassim, Mohcène, Zahra.

Aucun mot ne peut exprimer la profonde gratitude que je ressens envers ma famille Drid. Ils ont travaillé dur avec moi tout au long de ma vie pour m'aider à atteindre ce niveau. Mes parents bien-aimés, Khedidja أمي et Saleh أبي, que Dieu الله leur accorde une longue vie et les préserve pour moi, mes chères sœurs Samia, Sabrina et Nawal et son fils Ayhem, ainsi que mon frère unique Mohammed, ont tous joué un rôle crucial dans ma vie. Je tiens également à exprimer ma gratitude envers mon oncle Mohamed Sgahir, ma chère tante Naima et la fille de ma tante Samra, qui sont comme des sœurs pour moi.

Les mots ne peuvent exprimer à quel point je suis reconnaissante envers Walid Merrad, mon époux, pour son soutien inestimable et tous les sacrifices qu'il a consentis pour moi au cours de ces années de thèse.

À tous ceux que j'ai oublié de mentionner, je dédie ce travail en guise de remerciement.

Merci

الملخص

إن مشكل تآكل الأخاديد منتشر ومتطور بشكل متكرر في البيئات الجافة وشبه الجافة. الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو اختبار كفاءة ثلاثة نماذج فردية للتعلم الآلي لتصميم خرائط قابلية تآكل الأخاديد (GESM)، وتقييم أداء النماذج التي تم إنشاؤها والحصول عليها، واستكشاف فائدة هذه الخرائط لمساعدة صانعي القرار ومستخدمي الأراضي المحليين في تقييم تدهور الأراضي الزراعية خاصة.

إن مستجمعات مياه القصب (1570 كيلومترًا مربعًا) هي أرض زراعية وأكثر المناطق المتضررة والمتأثرة من تعرية التربة في التل الشرقي الجزائري، شمال شرق الجزائر.

لقد أدى انتشار المصاطب الغرينية والطين والمارن في المنطقة إلى تطوير أخاديد كبيرة جدًا. وأهم عواقب هذه الظاهرة الوخيمة هي ترسب الطمي في سد القصب، وفقدان الأراضي الزراعية، وعدم حماية مستجمعات المياه.

لتقييم تآكل التربة عن طريق الأخاديد في مستجمعات المياه هذه، تم تطبيق النماذج التالية: الغابة العشوائية (RF)، وتعزيز التدرج الشديد (XGBoost)، ونماذج الانحدار اللوجستي (LR). في المنطقة بأكملها، تم تحديد 565 (1475 خلية شبكية) تآكل أهدود من خلال تحقيق ميداني دقيق. تم اختيار أحد عشر عاملاً من عوامل تكييف تآكل الأهدود وتقييمها للعثور على أكثر المناطق عرضة لهذا الخطر. ثم تم تقييم أداء النماذج المطبقة الثلاث. تظهر النتائج أن نموذج XGBoost لديه أفضل أداء (AUC = 0.942)، خطأ قياسي = 0.009، و (CI = (0.893-0.971)).

يمكن أن تؤدي مطالبة مستخدمي الأراضي بتقييم تدهور الأراضي إلى زيادة وعيهم بعمليات التدهور المحلي وتحسين ملاءمة المؤشرات المحلية لتقييم التقدم المحرز في الحد من تدهور الأراضي، وخاصة الأراضي المستخدمة للزراعة.

الكلمات الرئيسية: تآكل الأخاديد · تدهور الأراضي · نظم المعلومات الجغرافية · التعلم الآلي · مستجمعات المياه في نهر القصب (الجزائر).

Résumé

L'érosion en ravines est un problème répandu et fréquemment développé dans les milieux semi-arides et arides. L'objectif principal de cette étude est de tester l'efficacité de trois modèles d'apprentissage automatique individuels pour la conception de cartes de susceptibilité à l'érosion en ravines (GESM), d'évaluer les performances des modèles générés et acquis, et d'explorer l'utilité de ces cartes pour aider les décideurs et les autorités locales.

Le bassin versant du K'sob (1 570 km²) est une terre agricole qui est la plus touchée par l'érosion des sols à Tell al-Sharqi, dans le Nord-Est de l'Algérie.

La prédominance des terrasses alluviales, argileuses et marneuses dans la zone a conduit au développement de très grandes de l'érosion en ravines. Les conséquences les plus importantes de ce phénomène désastreux sont l'envasement du barrage de K'sob, la perte de terres agricoles et le manque de protection des bassins versants.

Pour évaluer l'érosion en ravines dans ce bassin versant, les modèles suivants ont été appliqués : forêt aléatoire (RF), boosting de gradient extrême (EXBoost) et modèle de régression logistique (LR). Dans toute la région, 565 formes d'érosion (1475 réticulocytes) ont été identifiées par une plusieurs visites sur le terrain. Onze facteurs prédisposition sont été sélectionnés et évalués pour identifier les zones les plus susceptibles à cet aléa. Ensuite, les performances des trois modèles ont été évaluées. Les résultats montrent que le modèle XGBoost présente les meilleures performances (AUC = 0,942, erreur standard = 0,009 et IC « 0,893–0,971 ») comparativement aux autres.

Demander aux usagers des terres d'évaluer la dégradation des sols peut augmenter leur prise de conscience des processus de dégradation locaux et améliorer la pertinence des indicateurs locaux pour évaluer les progrès accomplis en vue de réduire la dégradation des terres, notamment celles utilisées à des fins agricoles.

Mots-clés : Erosion en ravines. Dégradation des terres. SIG. Apprentissage automatique. Bassin versant de la rivière K'sob (Algérie).

Abstract

Gully erosion is a widespread and frequently developed problem in semi-arid and arid environments. The main objective of this study is to test the effectiveness of three individual machine-learning models for the design of gully erosion susceptibility maps (GESM), to evaluate the performance of the generated and acquired models and to explore the usefulness of these maps to help decision makers and local authorities. Land users in the assessment of agricultural land degradation in particular.

The K'sob watershed (1,570 km²) is agricultural land and the area most affected by soil erosion in Tell al-Sharqi, in northeastern Algeria.

The predominance of alluvial, clay and marl terraces in the area has led to the development of very large gullies. The most important consequences of this disastrous phenomenon are the siltation of the K'sob dam, the loss of agricultural land and the lack of protection of the watersheds.

To assess soil erosion by gullies in these watersheds, the following models were applied: Random Forest (RF), Extreme Gradient Boost (EXBoost), and Logistic Regression (LR) models. Across the region, 565 gully erosions (1475 reticulocytes) were identified by careful field survey. Eleven factors conditioning gully erosion were selected and assessed to identify the areas most vulnerable to this risk. Then, the performances of the three applied models were evaluated. The results show that the XGBoost model has the best performance (AUC = 0.942, standard error = 0.009 and CI “0.893–0.971”).

Requesting land users to evaluate soil degradation can increase awareness of local degradation processes and can improve the local relevance of indicators to assess progress made in reducing land degradation, particularly for agricultural purposes.

Keywords: ravine erosion. Land degradation. GIS. Machine learning. Watershed of the K'sob River (Algeria).

Tables des Matières

Dédicace	
Remerciements	
المخلص.....	I
Résumé.....	II
Abstract.....	III
Tables des matières.....	IV
Listes des figures.....	XIII
Listes des tableaux.....	XVI
Acronymes.....	XVII
Introduction Générale.....	01

Chapitre 01 : Synthèse bibliographique

Partie 01 : Généralités sur l'érosion

1. Introduction.....	05
2. Erosion.....	05
2.1. Types d'érosion.....	07
2.1.1. L'érosion éolienne.....	07
2.1.2. L'érosion hydrique.....	09
3. Les types d'érosion hydrique.....	09
3.1. L'érosion en nappe (Sheet erosion).....	09
3.2. L'érosion linéaire (Rill Erosion).....	11
3.2.1. Erosion en griffes et rigoles.....	12
3.2.2. Erosion en ravine.....	12
3.3. Erosion en masse.....	14
3.3.1. Les glissements lents (creep).....	14
3.3.2. Les glissements rapides.....	14
3.3.3. Les versants moutonnés.....	15

3.3.4.	Les coulées boueuses (lave torrentielle).....	15
3.3.5.	Les glissements rotationnels en "coups de cuillère".....	16
3.3.6.	Les formes locales.....	17
4.	Mécanisme de l'érosion hydrique.....	18
4.1.	Le détachement.....	18
4.1.1.	La pluie.....	18
4.1.2.	Le ruissellement.....	20
4.2.	Le transport.....	20
4.3.	La sédimentation.....	21
5.	Facteurs influençant l'érosion hydrique.....	21
5.1.	Le climat.....	21
5.2.	La topographie.....	22
5.3.	La lithologie.....	22
5.4.	La végétation.....	22
5.5.	Les activités humaines.....	23

Partie 02 : Cartographie, méthodes utilisées et quelques études antérieures

1.	Introduction.....	24
2.	Quelques définitions.....	24
2.1.	Système d'information géographique (SIG).....	24
2.2.	Carte d'inventaire.....	24
2.3.	Cartographie des risques.....	25
2.4.	Risque naturel.....	25
2.5.	Modèle numérique de terrain (MNT ou DEM).....	26
2.6.	Aléa.....	26
2.7.	Susceptibilité.....	27
2.8.	Vulnérabilité.....	27
2.9.	Risque.....	27
2.10.	Logiciel R.....	27
3.	Classification des différentes méthodes de la cartographie de la susceptibilité.....	28
3.1.	Approches qualitatives.....	28
3.1.1.	La cartographie d'inventaire.....	28

3.1.2.	L'analyse géomorphologique.....	28
3.2.	Approches semi-quantitatives.....	29
3.2.1.	Logiques floues (Fuzzy logics).....	29
3.2.2.	Méthode du Processus de hiérarchie analytique (AHP).....	30
3.3.	Approches quantitatives.....	30
3.3.1.	Méthode du rapport de fréquence (FR).....	31
3.3.2.	Modèle de régression logistique (LR).....	31
3.3.3.	Méthode d'USLE (Universal Soil Loss Equation).....	32
3.4.	Modèles d'apprentissages automatiques (machine Learning models).....	33
3.4.1.	La forêt aléatoire (Random Forest).....	33
3.4.2.	EXtreme Gradient Boosting.....	33
4.	Un aperçu sur les études antérieures concernant l'érosion hydrique en Algérie et certains pays du monde et les méthodes utilisées pour l'évaluation.....	34
5.	Conclusion.....	40

Chapitre 02 : Description générale de la région d'étude

Partie 01 : Représentation géologique et morphologique

1.	Introduction.....	41
2.	Généralités sur le bassin versant du Hodna.....	41
2.1.	Situation géographique.....	41
2.2.	Relief.....	42
2.3.	Géologie.....	43
a.	Trais.....	43
b.	Jurassique et Carbonate.....	43
c.	Crétacé.....	43
d.	Paléocène.....	44
e.	Néogène.....	44
f.	Quaternaire.....	44
2.4.	Climat.....	45
2.4.1.	Pluviométrie.....	45
2.4.2.	Température.....	45
2.4.3.	Vent.....	46
2.4.4.	Humidité.....	46

2.5.	Couvert végétal.....	46
3.	Présentation de la zone d'étude.....	47
3.1.	Situation géographique.....	47
3.2.	Caractéristiques géomorphologiques du bassin versant du K'sob.....	48
3.2.1.	Caractéristiques de forme.....	48
a.	Superficie du bassin versant.....	48
b.	Périmètre du bassin versant.....	48
c.	Indice de compacité de Gravelius (Kc).....	48
d.	Longueur du thalweg principal.....	49
e.	Rectangle équivalent.....	50
f.	Temps de concentration.....	50
3.2.2.	Paramètres du relief.....	51
3.2.2.1.	La courbe hypsométrique.....	51
3.2.2.2.	Les altitudes caractéristiques.....	53
a.	Les altitudes : maximale et minimale.....	53
b.	L'Altitude moyenne.....	53
c.	L'altitude médiane.....	54
d.	L'Indice de pente.....	55
e.	L'Indice de pente globale (Ig).....	55
f.	La Dénivelée spécifique.....	56
3.2.3	Paramètres du réseau hydrographique.....	56
a.	Hiéarchisation du réseau hydrographique.....	57
b.	Densité de drainage.....	58
c.	Densité hydrographique.....	58
3.3.	Cadre géologique.....	60
3.3.1.	La géologie du bassin versant de l'Oued K'sob.....	60
3.3.2.	La litho-stratigraphie.....	60
a.	Quaternaire.....	61
a.1.	Alluvions récentes.....	61
a.2.	Alluvions anciennes.....	61
a.3.	Alluvions des plateaux.....	61
a.4.	Travertin.....	61
b.	Pliocène.....	61
c.	Miocène.....	61

d.	Oligocène.....	62
e.	Eocène.....	62
e.1.	Lutétien Supérieur.....	62
e.2.	Lutétien inférieur.....	62
e.3.	Yprésien.....	62
f.	Paléocène.....	62
f.1.	Dano- Montien.....	62
g.	Crétacé.....	62
g.1.	Crétacé supérieur.....	63
g.1.1.	Maëstrichtien.....	63
g.1.2.	Sénonien.....	63
g.1.3.	Turonien.....	63
g.1.4.	Cénomanién.....	63
g.2.	Crétacé inférieur.....	63
g.2.1.	Emschérien.....	63
g.2.2.	Albien.....	63
g.2.3.	Aptien supérieur.....	63
g.2.4.	Aptien inférieur- Barrémien.....	64
g.2.5.	Hauterivien.....	64
h.	Trias.....	64
3.3.3.	Structure tectonique.....	65
a.	Les failles.....	65
b.	Les plis.....	66
3.4.	La végétation.....	66
3.5.	La Sismicité.....	67
4.	Conclusion.....	68

Partie 02 : Etude Climatologique du bassin versant du K'sob

1.	Introduction.....	69
2.	Etude des paramètres climatologiques.....	69
2.1.	La pluviométrie.....	70
2.1.1.	Les précipitations annuelles.....	70
2.1.2.	Les précipitations mensuelles.....	71
2.1.3.	La répartition saisonnière des précipitations.....	72

2.1.4.	Le coefficient pluviométrique.....	73
2.2.	Températures.....	74
2.2.1.	Températures annuelles.....	75
2.2.2.	Températures mensuelles.....	76
2.2.3.	Températures saisonnières.....	77
2.3.	Régime climatique.....	78
2.3.1.	Diagramme ombro-thermique.....	78
2.3.2.	Indice d'aridité.....	79
2.4.	Evapotranspiration.....	80
2.4.1.	Estimation de l'évapotranspiration potentielle ETP.....	80
2.4.2.	Estimation de l'évapotranspiration réelle ETR.....	82
a.	Formule de L. Turc.....	82
b.	Formule d'A. Coutagne.....	82
c.	Formule de Thornthwaite.....	82
2.4.3.	Etablissement du bilan hydrique selon C.W.Thornthwaite.....	83
2.4.4.	Estimation du ruissellement.....	85
2.4.5.	Estimation de l'infiltration.....	85
3.	Conclusion.....	86

Chapitre 03 : Données utilisées et Méthodologie

1.	Introduction.....	87
2.	Description de la zone d'étude.....	87
3.	Méthodologie du travail.....	88
3.1.	Acquisition des données.....	88
3.2.	Construction de la carte d'inventaire.....	89
3.3.	Les facteurs de prédisposition à l'occurrence de l'érosion hydrique.....	98
a.	Carte d'altitude (élévation).....	99
b.	Carte d'exposition des versants.....	100
c.	Carte des pentes.....	101
d.	Carte de courbure du plan.....	102
e.	Carte de courbure du profil.....	103
f.	Carte de proximité aux routes.....	104
g.	Carte de proximité aux failles.....	105
h.	Carte de proximité aux réseaux hydrographiques.....	107

i.	Carte d' L'indice d'humidité topographique (TWI = Topographic Wetness Index).....	108
j.	Carte d'indice de végétation par différence normalisée (NDVI = Normalized Difference Vegetation Index).....	109
k.	Carte de La lithologie.....	110
4.	Conclusion.....	112

Chapitre 04 : Modélisation, Résultats et Discussions

1.	Introduction.....	113
2.	Test de multi-colinéarité.....	113
3.	Modélisation de la susceptibilité à l'érosion en ravines dans la zone d'étude.....	114
3.1.	La méthode de la forêt aléatoire (RF = Random Forest).....	115
3.2.	La méthode de le boosting de gradient extrême (XGBoost = Extreme Gradient Boosting).....	116
3.3.	La méthode de la régression logistique (Logistic Regression = LR).....	117
3.4.	Validation des modèles.....	118
4.	Résultats de la modélisation.....	118
4.1.	Test de multi-colinéarité.....	119
4.2.	Interprétations des résultats obtenues.....	120
4.2.1.	Modèle 1 basé sur la méthode RF.....	121
4.2.2.	Modèle 2 basé sur la méthode XGBoost.....	123
4.2.3.	Modèle 3 basé sur la méthode LR.....	126
4.3.	Résultats de la validation.....	128
5.	Discussions.....	129
6.	Étude comparative.....	134
7.	Conclusion.....	137
	Conclusion Générale.....	138
	Références bibliographiques.....	142
	Annexes.....	151

Liste des Figures

Fig.1. Processus d'érosion du bassin versant	07
Fig.2. Erosion Eolienne : Poussière et tempête, Nyngan	08
Fig.3. L'érosion en nappe <i>de fortes pluies / Nord de Arriba, Colorado</i>	10
Fig.4. Photo illustrant le phénomène d'érosion	11
Fig.5. Photo illustrant le phénomène d'érosion en griffes et en rigoles.....	12
Fig.6. Morphologie de l'érosion en ravines et processus liés à sa typologie.....	13
Fig.7. Erosion en masse <i>de St Geniez-de-Bertrand</i>	14
Fig.8. Différentes formes d'érosion en masse.....	15
Fig.9. Coulée de boue à <i>Vatagna</i>	16
Fig.10. Glissement rotationnel en coups de cuillère	16
Fig.11. Les formes locales.....	17
A. Eboulement des orgues d'une coulée de basalte.	
B. Fontis de 20 m de profondeur lié à un karst ayant provoqué l'effondrement d'un pavillon.	
C. Erosion des berges.	
Fig.12. Mécanisme de l'érosion hydrique	18
Fig.13. Effet splash	19
Fig.14. Mode de transport des particules dans les cours d'eau	21
Fig.15. Carte de localisation et situation du bassin versant de Honda.....	42
Fig.16. Le relief du bassin versant du Hodna.....	43
Fig.17. la Géologie du bassin versant du Hodna.....	44
Fig.18. Pluviométrie dans le bassin versant du Hodna	45
Fig.19. Localisation et situation géographique de bassin versant du K'sob.....	47
Fig.20. Carte hypsométrique du bassin versant Oued K'sob.....	52

Fig.21. Courbe hypsométrique du bassin versant K'sob.....	52
Fig.22. Carte des pentes du bassin versant Oued K'sob.....	55
Fig.23. Carte du réseau hydrographique du bassin versant Oued K'sob.....	57
Fig.24. la lithologie de bassin versant de Oued K'sob.....	64
Fig.25. Carte des failles de Bassin Versant de K'sob.....	65
Fig. 26. Carte de zonage sismique de l'Algérie	67
Fig.27. Variations des précipitations moyennes annuelles en mm (1989-2019).....	71
Fig.28. Variations des précipitations moyennes mensuelles en mm (1989-2019).....	72
Fig.29. Variations des précipitations saisonnières en mm (1989-2019).....	73
Fig.30. Les variations des températures moyennes annuelles en C° (1989-2019).....	76
Fig.31. Variations des températures moyennes mensuelles en C° (1989-2019).....	77
Fig.32. Les variations des températures moyennes saisonnières en C° (1989-2019).....	77
Fig.33. Diagramme ombro-thérmiqes du bassin versant Oued K'sob (1989-2019).....	79
Fig.34(A.B). Bilan hydrique selon C.W.Thornthwaite.....	84
Fig.35. Carte de localisation de la zone d'étude.....	88
Fig.36. Le matériel de terrain utilisé : les récepteurs GNSS bi-fréquence.....	90
Fig.37. Quelques exemples de l'érosion en ravines.....	91
a- Tuyauterie du sol dans un matériau dispersif (X = 4°47'33", Y = 35°59'10"),	
b- formation de l'érosion en ravines voisine d'un cours d'eau,	
c- l'érosion en ravines et l'érosion en nappe sévère dans la partie nord-est de la zone d'étude,	
d- le ravin actif est prolongé par l'érosion,	
e- érosion en ravines à travers un sol meuble.	
Fig.38. Images montrant certains des événements référencés sur Landsat 7.....	94

A. El Hammadia, BBA, Algérie ;

- B. Maâdid, BBA, Algérie ;
- C. Medjana, BBA, Algérie ;
- D. Bordj Ghdir, BBA, Algérie ;
- E. Oued K'sob, BBA, Algérie.

Fig.39. localisation et carte d'inventaire de la zone d'étude.....	97
Fig.40. Histogramme comparatif du nombre d'érosion hydrique identifiés par photo- interprétation, données d'archives et sur le terrain.....	98
Fig.41. Carte d'élévation de bassin versant du K'sob.....	99
Fig.42. Carte d'exposition des versants de bassin versant du K'sob.....	101
Fig.43. Carte de pentes de bassin versant du K'sob.....	102
Fig.44. Carte de courbure du plan de bassin versant du K'sob.....	103
Fig.45. Carte de courbure du profil de bassin versant du K'sob.....	104
Fig.46. Carte de proximité aux routes de bassin versant du K'sob.....	105
Fig.47. Carte de proximité aux failles de bassin versant du K'sob.....	106
Fig.48. Carte de proximité aux réseaux hydrographiques de bassin versant du K'sob.....	107
Fig.49. Carte d'indice d'humidité topographique de bassin versant du K'sob.....	108
Fig.50. Carte d'indice de végétation par différence normalisée de bassin versant du K'sob.....	109
Fig.51. Carte de La lithologie de bassin versant du K'sob.....	110
Fig.52. Organigramme de l'étude.....	114
Fig.53. Tracé d'erreur OOB du modèle RF 0 – non ravin (ligne rouge) et 1 – ravin (ligne verte).....	121
Fig.54. L'importance des facteurs d'influence dans les modèles de susceptibilité de l'érosion en ravines.....	122
Fig.55. Modèle RF.....	123
Fig.56. Performance XGBoosts classique avec différents paramètres.....	125

Fig.57. Modèle XGBoost.....	126
Fig.58. Modèle LR.....	127
Fig.59. Validation du modèle des cartes de susceptibilité à l'érosion en ravines.....	128
Fig.60. Les pratiques agricoles ont eu une sérieuse influence sur le remodelage de cette zone de l'érosion en ravines actives.....	134

Liste des tableaux

Tab.1. Formes d'incision due à l'érosion linéaire	11
Tab.2. Répartition hypsométrique du bassin versant du K'sob.....	51
Tab.3. Détermination de l'altitude moyenne du bassin versant de l'Oued K'sob.....	54
Tab.4. Classification de dénivelée spécifique d'après l'O.R.S.T.O.M	56
Tab.5. Récapitulatif des principales caractéristiques morphométriques du bassin versant du K'sob.....	59
Tab.6. Les coordonnées de la station pluviométrique de Bordj-Bou-Arreidj.....	70
Tab.7. Valeurs des précipitations moyennes annuelles (1989-2019).....	70
Tab.8. Valeurs des précipitations moyennes mensuelles en mm (1989-2019).....	71
Tab.9. Valeurs des précipitations saisonnières (1989-2019).....	72
Tab.10. Coefficient pluviométrique de station de Bordj Bou Arreidj (1989-2019).....	74
Tab.11. Valeurs des températures moyennes annuelles en C° (1989-2019).....	75
Tab.12. Valeurs des températures moyennes mensuelles en C° (1989-2019).....	76
Tab.13. Valeurs des températures saisonnières (1989-2019).....	77
Tab.14. Tableau récapitulatif des précipitations et températures (1989-2019).....	79
Tab.15. Résultats de calcul de l'ETPc par les formules de Thorntwaite.....	81
Tab.16. Bilan hydrique de la région d'étude d'une période d'observation allant de 1989-2019.....	83
Tab.17. Lithologie de la zone d'étude.....	111
Tab.18. Test de multi colinéarité entre les facteurs de conditionnement.....	119
Tab.19. Classes de susceptibilité de l'érosion en ravines pour les modèles LR et RF et XGBoost.....	120
Tab.20. Valeurs optimales des paramètres de XGBoost.....	124
Tab.21. Résultats de la procédure de validation.....	129

Acronymes

GESM: Gully Erosion Susceptibility Map.

AUC: Area Under the Curve.

ArcGis: Aeronautical Reconnaissance Coverage Geographic Information System.

XGBoost: eXtreme Gradient Boosting.

RF: Random Forest.

LR: Logistic Regression.

FAO: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

SIG : Systèmes d'Information Géographique.

UNDRO : United Nations Disaster Relief Organization.

MNT : Modèle Numérique de Terrain.

DEM: Digital Terrain Model.

R: language and environment for statistical computing and graphics, derived from the first letter of the names of its two developers, **Ross Ihaka** and **Robert Gentleman**.

SPSS: Statistical Package for the Social Sciences.

SAS: Statistical Analysis System.

APL: Application Programming Language.

Lisp: List processing.

AHP: Analytic Hierarchy Process.

FR: Frequency Ratio.

USLE: Universal Soil Loss Equation.

RUSLE: Revised Universal Soil Loss Equation.

EBF: Evidential Belief Function.

KNN: K-Nearest Neighbor.

GWR: Geographically Weighted Regression.

CF: Certainty Factor.

Acronymes

GBDT: Gradient Boosting Decision Tree.

INPE : Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

LU/LC: Land Use and Land Cover.

FD : Functional Diversity.

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques.

WGS: World Geodetic System.

UTM: Universal Transverse Mercator.

B.V : Bassin Versant.

O.R.S.T.O.M : Office de Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer.

CGS : Centre de Recherche Appliquée en Génie Parasismique.

TWI: Topographic Wetness Index.

NDVI: Normalized Difference Vegetation Index.

GPS: Global Positioning System.

QGIS: Quantum Geographic Information System.

ASTER: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer.

VIF: Variance Inflation Factor.

TOL: Tolerance Factor.

RMSE: Root Mean Square Error.

ROC: Receiver Operating Characteristic.

OOB: Out-Of-Bag.

MDA: Mean Decrease in Accuracy.

MDG: Mean Decrease in Gini.

GES: Gully Erosion Susceptibility.

Std. error: Standard error.

Acronymes

CI: Confidence Interval.

LSM: Landslide Susceptibility Model.

PISA: Previsioni dell'Interimento nei Serbatoi Artificiali.

ICONA: Institute for the Conservation of the Nature.

O.N.M : Office National de la Météorologie.

Introduction Générale

Introduction Générale

Le sol représente la couche supérieure et friable de la lithosphère de la Terre, avec une épaisseur qui varie de quelques centimètres à plusieurs mètres. Il est formé d'un assemblage de substances minérales et organiques, fournissant un environnement naturel et un support pour la croissance végétale (*Choubin et al., 2019*). Les sols sont exposés à toutes sortes de phénomènes naturels, notamment : érosion.

L'érosion des sols est l'un des phénomènes les plus dangereux au monde, en raison du mouvement et du transfert du sol de surface par diverses forces motrices, notamment l'eau, le vent, et mouvement de masse (*Bouguerra et al., 2017*). Il est classé comme le problème le plus populaire de dégradation des terres, couvrant non seulement les terres agricoles (*Ahmad et al., 2020*), mais aussi les prairies (*Minea et al., 2022*) et les terres forestières (*A. Kavian et al., 2010*). Elle est connue depuis l'Antiquité et est liée à des facteurs naturels et humains difficilement contrôlables (*Saha et al., 2019*).

L'érosion des sols est très active dans les régions arides et semi-arides et se produit lorsque de fortes précipitations se produisent dans des zones de couverture végétale clairsemée, de sols pauvres et de pentes abruptes (*Angileri et al., 2016*).

L'érosion des sols par l'eau est la plus répandue dans le monde et a été identifiée comme le phénomène le plus destructeur qui menace la durabilité des sols, entraînant des impacts négatifs sur la dégradation des terres agricoles, notamment (*Angileri et al., 2016; Saha et al., 2020*).

L'érosion hydrique est un problème majeur en Algérie, affectant gravement plus de 12 millions d'hectares de terres agricoles et de pâturages (*Benkadja et al., 2013*). Les zones telliennes sont considérées comme étant celles qui ont été les plus influencées par ce phénomène avec un pourcentage de 41% (*Benkadja et al., 2013*). Parmi ces zones, le bassin versant de la rivière du K'sob fait face à un grave problème de dégradation des terres, caractérisé par d'énormes pertes de terres agricoles dans la partie amont.

L'érosion en ravines est une forme très perceptible d'érosion du sol qui altère la capacité du sol, limite l'utilisation des terres et peut mettre en danger les routes et les structures. L'érosion en ravines est des cours d'eau aux flancs très abrupts, qui subissent des écoulements temporaires lors de précipitations excessives ou prolongées. Le suivi de l'érosion en ravines peut être délicat et coûteux. Elle peut être justifiée sur des sols de bonne qualité lorsqu'il existe une possibilité pratique de succès ou lorsqu'une route ou un bâtiment sont mis en danger par l'érosion en ravines. Cependant, pour les zones de sols pauvres, cette tâche devient difficile et

peut être irréalisable. Pour cette raison, la prévention vaut bien mieux que le contrôle. Parmi les moyens qui nous aident à prévenir ce phénomène, il y a les cartes de susceptibilité à l'érosion en ravines (*GESM Gully Erosion Susceptibility Map*), qui sont générées pour gérer l'érosion en ravines pour atteindre développement durable (Arabameri et al., 2019b).

Des facteurs pétrologiques, climatiques et anthropologiques ont rendu les sols fragiles et sensibles à l'érosion hydrique dans le bassin versant de la rivière du K'sob. Ce problème s'aggrave chaque année et nécessite des mesures techniques et économiques pour l'atténuer. Bordj-Bou-Argeridj est considéré comme une région semi-aride, ce qui la rend très susceptible au phénomène de l'érosion en ravines en raison des fortes pluies et des attaques humaines sur l'environnement (Benkadja et al., 2015; Benkadja et al., 2013).

Cette étude a été menée dans le bassin versant de la rivière du K'sob dans le Nord-Est de l'Algérie. Le bassin est caractérisé par un climat semi-aride. À ce jour, aucune recherche n'a été menée dans cette zone d'étude pour évaluer ou fournir des informations sur l'érosion en ravines.

Objectifs de la recherche

Les objectifs de cette étude comprennent spécifiquement ce qui suit :

- (1) Tester l'efficacité de trois modèles individuels pour le GESM ;
- (2) Evaluer les performances des modèles modélisés et de les valider à l'aide de l'AUC, de la std. l'erreur et l'intervalle de confiance à 95 % ;
- (3) Explorer l'utilité de ces cartes pour aider les décideurs et les utilisateurs locaux des terres à évaluer la dégradation des terres.

Par conséquent, l'objectif principal de cette étude est d'évaluer les zones sujettes aux l'érosion en ravines à l'aide de différents modèles et techniques et de comparer leurs résultats. Ces modèles aident à prédire les zones d'érosion des sols, à préparer un meilleur schéma pour les terres agricoles et à réduire l'érosion.

Cette étude vise également à contribuer à une meilleure connaissance de la susceptibilité à l'érosion hydrique dans la zone d'étude afin d'informer les administrations locales et la population sur les possibilités d'érosion hydrique qui peuvent survenir.

La cartographie de la susceptibilité à l'érosion est une étape importante avant la mise en œuvre de mesures spécifiques de prévention, d'assainissement et d'atténuation des sols. Ces

cartes fournissent des informations importantes sur cet événement aux décideurs (par exemple, le degré de susceptibilité et son emplacement probable), mais ne décrivent pas les procédures de restauration, qui doivent être déterminées.

Notre zone d'étude est actuellement sujette de l'érosion en ravines. Pour cela, il faut résoudre ce problème d'érosion des sols avant aggravation. Dans cette étude, nous explorerons les algorithmes XGBoost, Random Forest et Logistic Regression, et comparerons leurs implémentation et leurs performances. Nous verrons comment fonctionnent ces algorithmes puis nous construirons des modèles de classification basés sur ceux-ci sur la base des données obtenues pour l'érosion en ravines afin de classer cette zone comme vulnérable à l'érosion ou non. Nous évaluerons ensuite les modèles et comparerons les résultats.

Organisation générale de la thèse

Le manuscrit est composé par 4 chapitres :

Le premier chapitre : Il est divisé en deux parties. Une synthèse bibliographique sur l'érosion hydrique, ses différents types et les facteurs qui la contrôlent, sont présentés *dans la première partie*.

Ensuite, dans *la deuxième partie*, nous discutons les méthodes utilisées pour évaluer l'érosion hydrique à l'aide des systèmes d'informations géographiques. Ce chapitre se termine par un aperçu sur des études antérieures dans le monde.

Le deuxième chapitre, Il est composé de deux parties, *la première partie* présente une description générale de la géographie physique, de la géologie, des propriétés du sol et de la couverture végétale du bassin versant du K'sob.

Dans *la partie 2* : les facteurs de prédisposition les plus importants à la détermination de l'équilibre hydrique, tels que les précipitations, la température et l'évapotranspiration ont été montrés.

Dans **le troisième chapitre**, nous avons expliqué comment préparer une carte d'inventaire avec des visites sur terrain.

Ensuite, nous avons préparé 11 cartes à l'aide d'ArcGIS. Chacune de ces cartes représente un facteur qualifié qui influence l'occurrence de l'érosion hydrique. Tous ces facteurs jouent un rôle important dans la création de la carte de susceptibilité finale.

Le quatrième chapitre de cette thèse, présente une évaluation de la susceptibilité à l'érosion en ravines sur la base de trois méthodes d'apprentissage automatique différentes : forêt aléatoire (Random Forest RF), boosting de gradient extrême (Extreme Gradient Boosting XGBoost) et régression logistique (Logistic Regression LR), afin d'obtenir enfin trois cartes qui identifient les zones sujettes à l'érosion hydrique, et aussi de découvrir la méthode d'apprentissage automatique la plus efficace. Les résultats et interprétations de la modélisation de la susceptibilité pour les trois méthodes ont été présentés et discutés.

Enfin, nous soulignons les résultats les plus importants de nos travaux dans une conclusion générale.

Chapitre 01

Synthèse bibliographique

Partie 01

Généralités sur l'érosion

1. Introduction

L'érosion des sols est une menace mondiale majeure pour la durabilité des agroécosystèmes et la productivité des terres. Pour connaître le pourcentage d'érosion du sol, nous utilisons différentes méthodes pour identifier où se situe l'érosion du sol (*selon l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA)*).

Plusieurs auteurs, dont les plus récents, ont depuis longtemps identifié Les effets néfastes de l'érosion des sols (*BENCHETTOUH, 2012; Borges, 1993; BOUHADEB, 2019; Le Bissonnais et al., 2002; MAAMAR KOUADRI, 2019; MEGHRAOUI, 2019; Tani & Abdessalem, 2019*). L'érosion hydrique est un phénomène taillé qui a des impacts importants sur les infrastructures, les cultures et l'environnement.

L'érosion hydrique est l'une des principales causes de la dégradation des terres agricoles. La perte de grandes quantités de sédiments a entraîné progressivement la déformation du patrimoine pédologique agricole du bassin versant. Elle constitue une menace sérieuse pour la production agricole et les infrastructures en milieu rural (*BOUHADEB, 2019*).

2. Erosion

Selon la FAO (*Roose, 1994*), l'érosion est dérivée du verbe latin "erodere", signifiant "ronger". Il décrit l'ensemble des phénomènes qui contribuent à la modification de la forme du relief sous l'action d'agents érosifs (en particulier l'eau) (*Georges, 2008*).

L'érosion est le mécanisme par lequel les particules du sol sont séparées et déplacées de leur emplacement d'origine par des vecteurs (eau, vent, travail du sol) (*Poesen & Govers, 1990*). Les sols deviennent plus sensibles à l'érosion lorsque la couche protectrice de végétation naturelle est supprimée. Les activités de construction (routes, fossés, maisons...) exposent également les sols à ce type de mécanisme (*Clément, 2004*).

L'érosion se produit lorsque la force entraînant et transportant le matériau est supérieure à la force empêchant son mouvement. La force est exercée en surface par le vent, la pluie et le ruissellement (*Borges, 1993*).

Dans la première méthode, l'épaisseur du sol est contrôlée par la relation entre la vitesse de production et le mouvement du matériau. Les sols sont créés par des agents d'altération qui altèrent et décomposent les roches brutes et les déplacent à travers des processus d'entraînement et de transport. Si les deux processus sont identiques, l'épaisseur du fond reste constante. Les

problèmes d'érosion du sol surviennent lorsque la vitesse de déplacement (érosion) est supérieure à la vitesse de formation du sol. En revanche, lorsque la vitesse de formation du sol est supérieure à la vitesse de déplacement, le sol formé va se tasser et son épaisseur va augmenter (*Borges, 1993*).

Si les deux processus sont identiques, l'épaisseur du fond reste constante. Les problèmes d'érosion du sol surviennent lorsque la vitesse de déplacement (érosion) est supérieure à la vitesse de formation du sol. Dans ce cas, le taux de déplacement (ou taux d'érosion) est limité par le taux de production. Le premier était limité par l'entraînement de l'écoulement et la capacité de transport des solides. Par conséquent, l'évaluation de l'érosion des sols agricoles détermine non seulement les pertes au sol par des règles empiriques, mais aussi la disponibilité de sédiments sur les pentes (la fonction d'équilibre entre la production et le mouvement du sol) et les flux qui s'y produisent (*Borges, 1993*).

Lorsque le changement d'épaisseur du sol est nul, la formation et le déplacement du sol atteignent l'équilibre. Dans ce cas, le taux de déplacement (ou taux d'érosion) est limité par la productivité, tandis que le premier est limité par la capacité d'entraînement de l'écoulement et la capacité de charge des solides. Ainsi, l'évaluation de l'érosion des sols agricoles dépend non seulement de la détermination empirique de l'érosion des sols, mais aussi de la disponibilité en sédiments sur le versant (fonction de l'équilibre entre production et migration du sol) et du ruissellement qui s'y produit (*Borges, 1993*) (*Fig.1*).



Fig.1. Processus d'érosion du bassin versant (Source : © Agence française pour la biodiversité / Réalisation Matthieu Nivesse (par l'OIEau), 2018)

Les processus d'érosion dépendent de nombreux facteurs en interaction et sont donc complexes à modéliser. Il existe maintenant un consensus sur les facteurs d'érosion à prendre en compte lors de l'étude des phénomènes d'érosion tels que les précipitations, le sol, la topographie et l'occupation des sols (Wischmeier & Smith, 1978).

2.1. Types d'érosion

Deux facteurs naturels, le vent et l'eau, contribuent toujours à l'érosion des sols. On peut donc parler de deux types d'érosion des sols : l'érosion éolienne et l'érosion hydrique.

2.1.1. L'érosion éolienne

Le vent exerce une pression sur les particules solides stationnaires sur la surface exposée au flux d'air, contrant les forces de frottement au-dessus du centre de gravité et centrées à la base de la particule. Ces deux forces forment une paire et ont tendance à faire basculer ou rouler les particules lourdes (0,5 à 2 mm), les faisant être aspirées vers le haut en raison de la différence de vitesse entre le bas et le haut de la particule. Les particules plus légères montent verticalement jusqu'à ce que le gradient de vitesse ne les supporte plus. Ils tombent ensuite selon une trajectoire subhorizontale, entraînés par le vent. En tombant, ces grains de sable dynamisent

d'autres grains de sable (comme les pistes de bowling) ou s'effondrent en agrégats d'argile boueuse pour libérer de la poussière (Heusch, 1988).

Le vent est une force qui agit sur la surface du sol, et l'effet du vent sur la surface du sol varie en fonction des propriétés et des conditions du sol. En surface, l'érosion n'est dangereuse que lorsque les précipitations annuelles sont inférieures à 600 mm et que la saison sèche dure plus de six mois. Après cela, le sol devient poudreux, riche en limon, sable fin et matière organique rare, végétation instable, fragile, et des vents soufflant sur 20 kilomètres (Roose, 1987).

Par conséquent, les vents violents qui accompagnent la tempête provoquent des coulées massives de sable sur sol sec, un phénomène dans lequel les semis sont attaqués ou recouverts de grains de sable, entraînant des pertes de culture importantes. Le processus de désertification est exacerbé par l'érosion éolienne, qui varie selon le couvert végétal. Ce type d'érosion se traduit par une perte de 100 à 250 tonnes/ha de sol par an dans les prairies défrichées (Bouzid & Mokhtar, 2006) (Fig.2).



Fig.2. Erosion Eolienne : Poussière et tempête, Nyngan (Crédit © : Peter Robey/DPIE)

2.1.2. L'érosion hydrique

L'érosion hydrique est considérée comme l'une des principales causes de la dégradation des terres, en particulier dans les bassins versants (*Conoscenti et al., 2014*).

L'érosion des sols liée à l'eau est l'un des risques naturels les plus importants dans les régions arides et semi-arides. Dégradation des sols, perte de ressources en sols, perte de fertilité des sols, désertification, destruction des infrastructures humaines (impacts sur site), ainsi que dépôt de matériaux sur les cours d'eau et les pentes en aval, impacts sur les ressources, impacts sur la qualité des eaux de surface et les coûts économiques et écologiques qui en résultent pour la société, affectant ainsi négativement son développement durable (impacts hors site) (*Arabameri et al., 2018a*).

Dans les zones de production agricole, d'expansion démographique, de construction et d'urbanisation, ainsi que d'activités humaines, l'érosion des sols est un problème majeur (*Ding et al., 2015*). Les processus d'érosion des sols sont très actifs dans les écosystèmes arides et semi-arides en raison des fortes précipitations, de la réduction de la couverture végétale, de la diminution de la teneur en matière organique du sol et de la matrice érodable (*Samanta et al., 2016*) (*Fig.3*).

3. Les types d'érosion hydrique

Ce type d'érosion est causé par la pluie et entraîne le détachement des particules primaires du sol. Elle est définie comme la perte de sol due à l'eau qui déracine le sol et le transporte là où se trouvent les sédiments (*Hadjadj, 2020*).

L'érosion hydrique est un phénomène complexe défini comme la ségrégation et le transport des particules de sol de leur emplacement d'origine à l'emplacement des sédiments par l'eau. Le sol absorbe l'excès d'eau lorsque l'eau de pluie ne peut plus pénétrer dans le sol, lorsque l'intensité des précipitations dépasse la perméabilité de la surface du sol, ou lorsque l'eau de pluie tombe à la surface partiellement ou totalement saturée. Ce comportement provoque un refus. Dans ce cas, du sol est présent (*Le Bissonnais et al., 2002*).

On distingue plusieurs formes d'érosion hydrique :

3.1. L'érosion en nappe (Sheet erosion)

L'érosion en nappe entraîne l'épuisement des couches d'humus, l'amincissement des sols et le blanchissement des sommets des collines. Habituellement, les couches supérieures plus

foncées sont érodées en premier et les couches inférieures plus claires apparaissent à la surface. Si rien n'est fait pour corriger cette érosion initiale, elle évoluera vers une érosion linéaire : griffes, rigoles et ravines (Morsli et al., 2004).

L'érosion en nappe est associée à deux mécanismes (Fig.3) :

* détachement, des particules de sol sous l'effet des gouttes de pluie (effet splash) (Sabir, 1987) ;

* Ruissellement, lorsque l'intensité de la pluie est supérieure au taux d'infiltration (ruissellement hortonien).

Les signes permettant de reconnaître l'érosion en nappe sont l'apparition de zones distinctes aux endroits les plus érodés et la remontée de cailloux à la surface du sol (A, 2011). Les résultats de l'érosion en nappe sont (Roose, 1994):

- Le nivellement de la surface du sol.
- La squelettisation des horizons superficiels.
- Le décapage de l'horizon humifère.



Fig.3. L'érosion en nappe de fortes pluies / Nord de Arriba, Colorado Photo prise par : Grant Heilman, source : Alamy.

3.2. L'érosion linéaire (Rill Erosion)

Ce type d'érosion se produit lorsque les précipitations dépassent la capacité d'infiltration de la surface. Tout d'abord, une flaque d'eau se forme et une flaque d'eau se forme. Une flaque d'eau est un courant d'eau qui se diffuse et se concentre sur des lignes abruptes, atteignant des vitesses d'environ 25 cm par seconde (*Hjulström, 1935*), en arrachant des particules de plus en plus grosses, il est possible de creuser des formes de plus en plus profondément dans le sol. De petits canaux se forment et peuvent être divisés en trois types : griffes (quelques centimètres de profondeur), rigoles (la profondeur dépasse 10 cm), en ravines (quelques mètres) (*Roose, 1984*). Le tableau 1, montre les différentes formes de l'érosion linéaire (*Fig.4*) :

Tab.1. Formes d'incision due à l'érosion linéaire (*Tani & Abdessalem, 2019*).

Formes	Tracé	Longueur	Largeur	Profondeur
Griffe	Sinueux	< 1 m	< 10 cm	5-6 cm
Rigole	Sinueux	Dizaine de m	5-70 cm	10- 30 cm
Ravine	Peu sinueux	Centaine de m	50 cm à 1 m	30-50 cm
Petit ravin	Peu sinueux	Centaine de m	50 cm à 1 m	50-200 cm



Fig.4. Photo illustrant le phénomène d'érosion linéaire prise par : *Thomas Binet, 2007*.

3.2.1. Erosion en griffes et rigoles

L'écoulement devient plus concentré, créant ses passages d'abord sous la forme de griffes, puis l'eau des ponceaux s'écoulement à travers des fissures bien définies sous cette forme qui marquent des rigoles, bien que petites, à la surface de la terre. Améliore l'expansion (Heusch, 1970) (Fig.5).



Fig.5. Photo illustrant le phénomène d'érosion en griffes et en rigoles (Roose., 1994)

3.2.2. Erosion en ravine

L'érosion en ravines est un chenal profond avec une concentration de courants d'eau. Ce type de ruissellement intensif ou d'érosion des voies de vallée peut également se produire dans les zones de faible pente (de l'ordre de 1% dans les thalwegs et 2% sur les versants qui les alimentent) et lors d'épisodes pluviométriques de faible intensité (Souchère et al., 1998).

Le processus de formation de l'érosion en ravines dans la nature. On observe ici le premier type de l'érosion en ravines en V imprimées dans un matériau sablo-argileux homogène plus ou moins meuble, sablo-argileux ; argileux, marneux ou schisteux. Un deuxième type de l'érosion en ravines en forme de U est courant dans des matériaux différents. Les érosions en ravines imbriquées en forme de U ont été observées dans de vastes zones agricoles, se développant dans les lits de semence, les champs cultivés et le limon cohésif des plaques de labour. Il existe une troisième forme de l'érosion en ravines encore plus difficile à traiter. Les chenaux tunnels se développent sur des argiles gonflantes (comme les Vertisols, sols bruns

tropicaux) ou des marnes riches en gypse ou autres minéraux solubles (communs en région méditerranéenne) (Roose, 1994) (Fig.6).

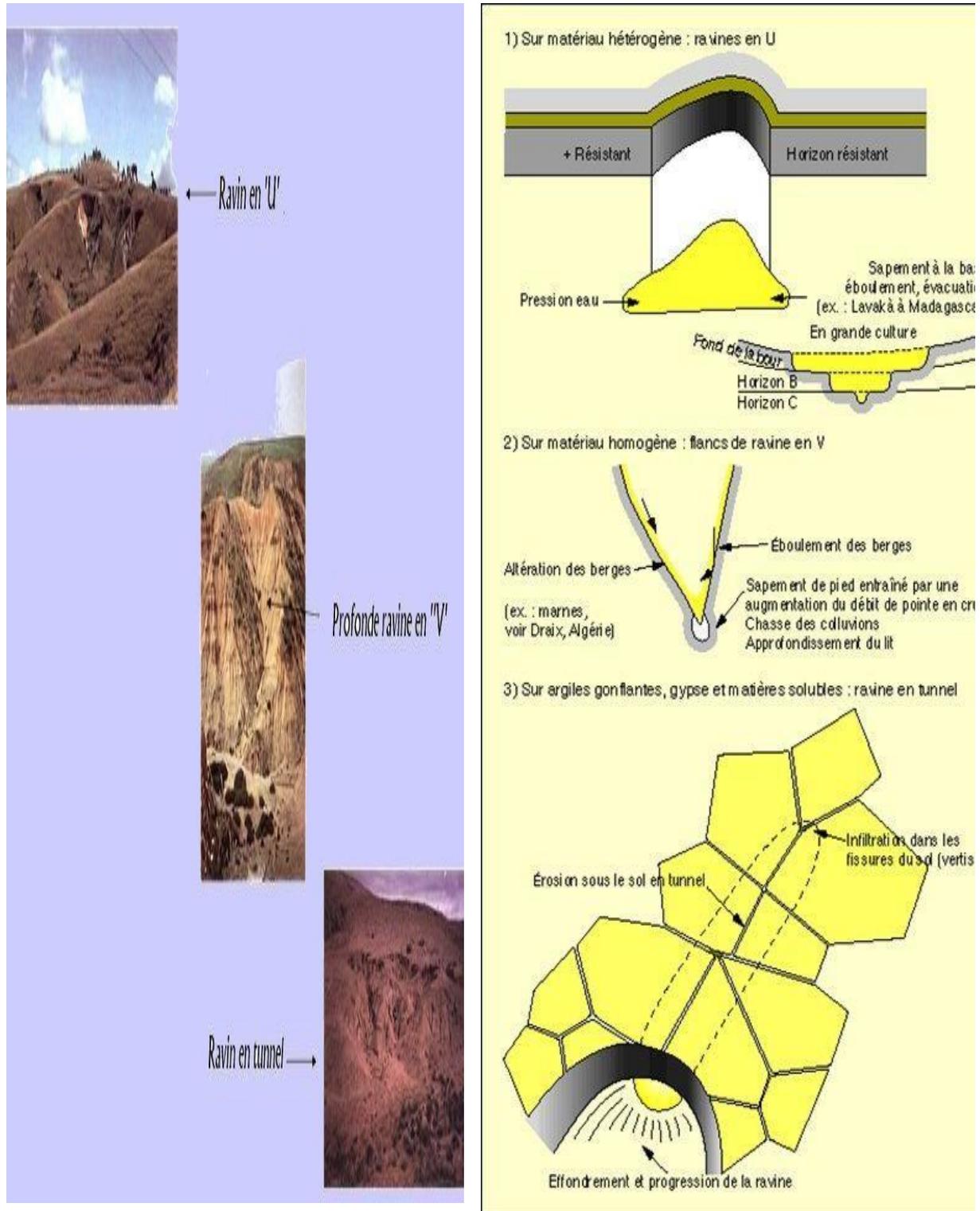


Fig.6. Morphologie de l'érosion en ravines et processus liés à sa typologie (Roose, 1994).

3.3. Erosion en masse

Ce type d'érosion en masse concerne un déplacement d'un volume de sol à l'intérieur de la couverture pédologique (Roose, 1994) (Fig.7).



Fig.7. Erosion en masse de St Geniez-de-Bertrand (Aveyron, Midi-Pyrénées, avril 2009) © BRGM - I. Bouroullec

Il existe de nombreux phénomènes de mouvements de masse, mais ils peuvent être divisés en six catégories (Fig.8) :

3.3.1. Les glissements lents (creep)

C'est un couvre-sol glissant plus ou moins lentement, presque sans séparation, que l'on trouve souvent sur des pentes abruptes, grâce à la forme couchée des jeunes plantes forestières et à la base arquée des arbres. Arbre adulte. Dans les zones arboricoles, la migration des animaux le long des pentes peut également entraîner la formation d'escaliers formés par des réseaux de fissures (Moeyersons, 1989; Roose, 1994).

3.3.2. Les glissements rapides

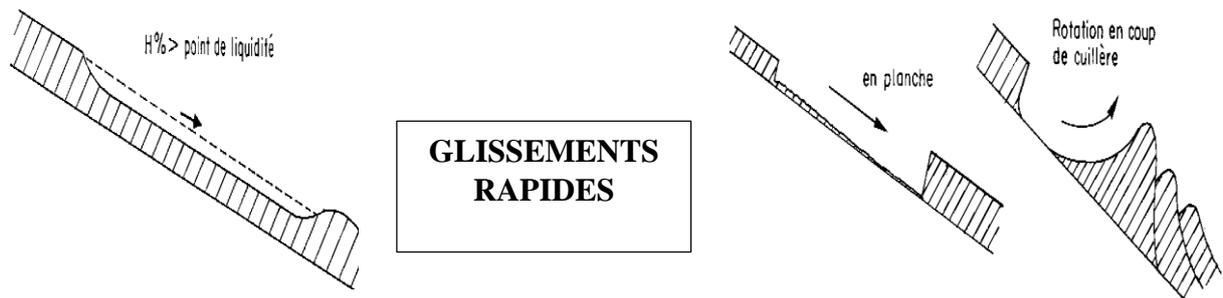
Un événement de glissement de terrain est le détachement d'une couche de sol plus ou moins épaisse qui glisse sur un horizon plus compact (notamment la roche altérée) et agit comme une surface de glissement. Ce type est très courant dans les schistes (pendages conformes), les gneiss et les maars altérés qui plongent parallèlement au terrain (Roose, 1994).

3.3.3. Les versants moutonnés

Lorsque le substrat passe par le point de plasticité et s'étend lentement comme un dentifrice entre le réseau racinaire retenant le substrat et la couche imperméable dense représentée par l'inhomogénéité des marnes et des mudstones, par exemple, une forme flexible est exposée à l'état humide (Roose, 1994).

3.3.4. Les coulées boueuses (lave torrentielle)

Ce sont des mélanges denses d'eau et de sol qui ont traversé le point liquide et éliminent rapidement des quantités importantes de boue et de gros morceaux de roche. Lorsqu'ils viennent d'émerger, ils apparaissent sous la forme de canaux fermés par le langage matériel avec une texture très étrangère (cônes de dépression). Le matériau fin est ensuite ramassé par l'érosion hydrique dans les formations et les rigoles, laissant en place des cailloux et des rochers de taille très inégale. Il se produit souvent après des glissements de terrain dans les lits des rivières et des canyons lors de fortes pluies (Roose, 1994; Temple & Rapp, 1972) (Fig.9).



1) Coulées boueuses

2) Glissements de terrain

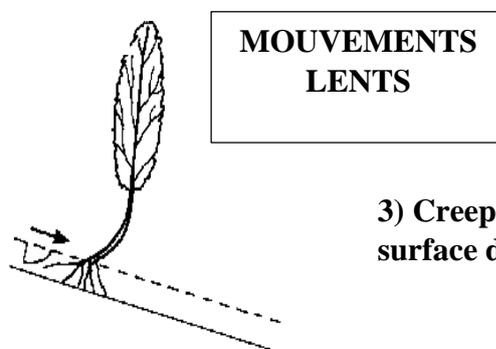


Fig.8. Différentes formes d'érosion en masse (Roose, 1994).



Fig.9. Coulée de boue à Vatagna (Jura, 2002). © BRGM - D. Moiriat

3.3.5. Les glissements rotationnels en "coups de cuillère"

Ce sont des glissements de terrain, dans lesquels la surface de la terre et une partie de sa masse glissent vers le bas lors de la rotation, créant une pente inverse sur la pente. C'est souvent toute une série de coups de cuillère qui donne au paysage un aspect moutonné. Au creux du coup de cuillère, on observe couramment des zones humides où pousse une végétation adaptée au changement de phase de l'eau (carex). Le ruissellement se dépose souvent en bordure de contrepente après des périodes de temps très humide. Avec l'érosion en ravines, la contrepente disparaît progressivement, ne laissant qu'un vallon sur le versant, ce qui le rend difficile à distinguer de l'érosion en ravines normal (Roose, 1994) (Fig.10).

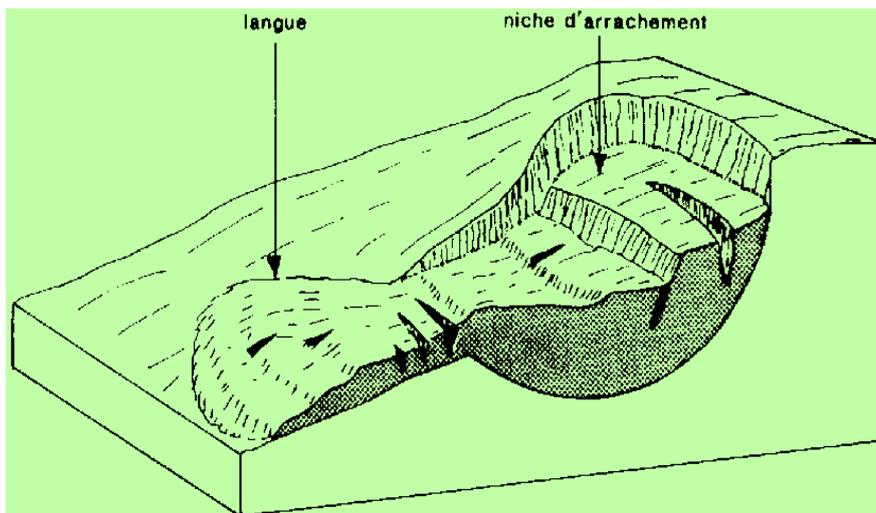


Fig.10. Glissement rotationnel en coups de cuillère (d'après Neboit, 1991).

3.3.6. Les formes locales

Il s'agit d'éboulements rocheux, d'érosion des berges ou d'effondrements de versants entraînant des glissements de terrain localisés. Ceux-ci sont très courants aux têtes de l'érosion en ravines : Ils provoquent l'effondrement de la partie supérieure de la lèvre de l'érosion en ravines, qui fait avancer l'érosion en ravines jusqu'au sommet de la colline en reculant l'érosion. On le trouve également dans les oueds, en particulier dans les parties concaves de la rivière lorsqu'elle forme un méandre (*Roose, 1994*) (*Fig.11*).



Fig.11. Les formes locales : A. Effondrement d'organes fluviaux basaltiques (Borne, Haute-Loire, 2007). © BRGM - F. Michel ; B. Fontis à 20 m de profondeur associé au karst qui a provoqué l'effondrement du pavillon (Saint-Pryvé Saint-Mesmin, Loiret, 2010). © BRGM ; C. Erosion des berges - Gorges de la Cèze (Occitanie, 2008). © Terra - L. Mignaux.

4. Mécanisme de l'érosion hydrique

L'érosion hydrique est définie comme un phénomène dans lequel trois mécanismes interagissent comme le montre la (Fig.12) : le détachement des particules dans le sol, le transport et la sédimentation de sol sous l'influence de l'eau de pluie, et du ruissellement lorsque le sol n'est plus perméable à l'eau (L, 1997).

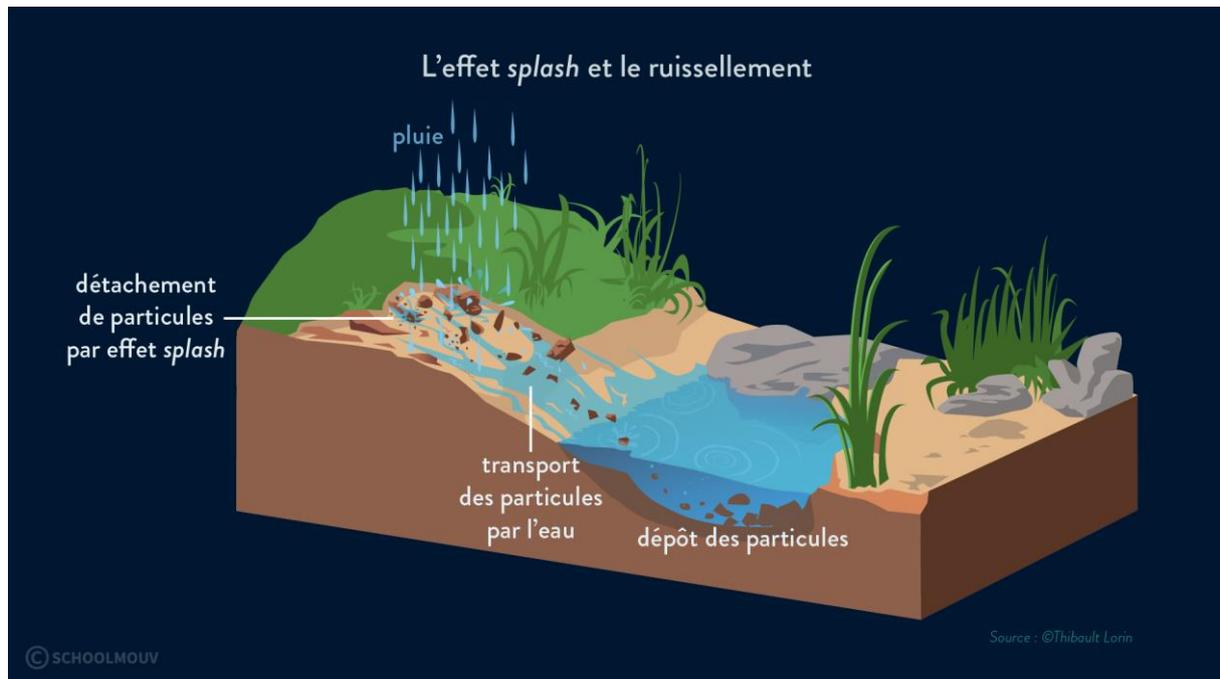


Fig.12. Mécanisme de l'érosion hydrique (© Source : Thibault Lorin, © SCHOOL MOUV).

4.1. Le détachement

La ségrégation des particules de sol se produit sous l'influence de deux moyens d'érosion.

4.1.1. La pluie

L'eau de pluie est reconnue depuis longtemps comme un facteur important d'érosion des sols (Ekern, 1951; Ellison, 1944). L'action des gouttes de pluie sur la surface du sol sépare les particules du sol. Quatre principaux mécanismes de détachement ont été identifiés :

- **L'éclatement** ; Lié à la compression de l'air emprisonné lors de l'humectation. Les argiles sont moins affectées par l'éclatement que les sols limoneux ou sableux en raison de leur porosité réduite et de leur grande capacité de rétention d'eau (Bissonnais, 1990).
- **La désagrégation mécanique** ; C'est parce que l'énergie est dissipée lorsque les gouttes de pluie entrent en collision. Cette énergie est convertie en forces de cisaillement,

provoquant la ségrégation des particules de sol sous l'effet « splash » (Al-Durrah & Bradford, 1982) (Fig. 13).



Fig.13. Effet splash Source - © 2013 Lionel Cottetot, INRA Orléans

- **La microfissuration** ; Les phénomènes de dilatation et de contraction qui se produisent lors des cycles d'humidification et de séchage des sols argileux provoquent des microfissures dans les granulats et contribuent ainsi à une réduction de leur diamètre moyen (Bissonnais, 1990).
- **La dispersion physico-chimique** ; Cela correspond à une diminution des forces d'attraction entre les particules colloïdales lors du mouillage. Cela dépend de la taille et de la valeur des cations (en particulier du sodium) dans le sol qui peuvent lier les charges négatives. La dispersion est le mécanisme de désagrégation le plus efficace car elle affecte la structure de base des agrégats. Ce mécanisme amplifie d'un facteur 10 l'action d'autres mécanismes (Le Bissonnais et al., 1995).

Après l'impact des gouttes de pluie, les gouttelettes d'eau et les débris de sol sont projetés de la surface et sont transportés radialement autour du point d'impact avant de tomber à la surface. Cette éclaboussure d'eau et de sol est souvent appelée « splash » (Nord, 2006).

4.1.2. Le ruissellement

Le mouvement des masses d'eau est un important facteur d'érosion. Séparez, transportez et exportez les débris de sol. Le ruissellement de surface résulte de la saturation de la porosité du sol (mécanisme de Dunne) ou du refus d'infiltration dû à l'intensité des précipitations dépassant la capacité d'infiltration de la surface du sol (mécanisme de Horton) (*Leguédois, 2003*).

Les principales variables contrôlant les effets du ruissellement sur le dépôt et la migration des particules sont le gradient, la vitesse d'écoulement et l'épaisseur de l'écoulement (*Giménez & Govers, 2002*). Les propriétés du ruissellement (débit, hydraulique et répartition spatiale) dépendent également fortement de la rugosité de la surface (*Govers et al., 2000*). Actuellement, le développement de méthodes ne permet pas des mesures directes et précises de la vitesse et de l'épaisseur des minces couches d'eau contenant des sédiments à grande échelle. Cependant, ces deux variables se combinent souvent pour former un paramètre hydraulique physiquement important lié à la séparation et au transport des sédiments (*Giménez & Govers, 2002*).

4.2. Le transport

Une fois séparées, les particules de sol parcourent des distances plus ou moins longues. En plus des effets sur la dissolution et la séparation, les effets des gouttes de pluie peuvent être dus à des « éclaboussures » sur le sol (*Cerdan, 2001*). C'est le moteur principal de l'évolution structurale et du déplacement latéral des particules de sol avant le début du ruissellement.

Le ruissellement est le principal moyen de transport des débris de sol se déplaçant sur les surfaces. Dans les fines couches d'eau qui s'écoulent à la surface lors de l'érosion, les débris du sol sont transportés par suspension, salinisation et traction (*Moss et al., 1980*).

Les particules retirées peuvent se déplacer dans le flux de trois manières (*Govers et al., 2000; Yalin, 1972*) (*Fig. 14*) :

- ✓ **En suspension** : L'écoulement ou l'impact des gouttes de pluie sur une couche d'eau crée une turbulence qui maintient les particules fines en suspension. Ces fines particules sont transportées sur de longues distances.
- ✓ **Par roulement (traction)** : Lorsque le débit devient important, les particules plus grosses peuvent être détruites, mais pas mises en suspension. La force du courant électrique les fait rouler vers le bas.

- ✓ **Par saltation** : Si les particules sont de taille moyenne, elles peuvent se déplacer par sauts successifs (saltations). Ce phénomène est particulièrement important dans des conditions venteuses.

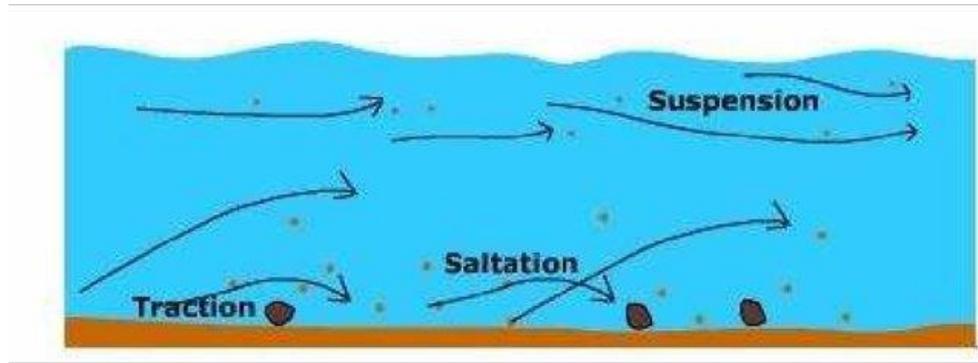


Fig.14. Mode de transport des particules dans les cours d'eau (Saber Najib, 2008)

4.3. La sédimentation

La sédimentation est un mécanisme qui permet de contrôler et de limiter la quantité de sédiments rejetés. Se produit lorsque la capacité de charge du flux est dépassée. Cette troisième étape du processus d'érosion hydrique est B. lorsque le débit ralentit. Les particules grossières se déposent en premier, les particules plus fines se déplacent plus loin. C'est ce qu'on appelle le tri granulométrique (*Kauark Leite, 1990*).

5. Facteurs influençant l'érosion hydrique

Les principaux facteurs qui influent directement ou indirectement l'érosion hydrique sont : climat, topographie, lithologie et végétation, activité humaine.

5.1. Le climat

Plus les précipitations sont intenses et longues, plus le risque de ruissellement et d'érosion est grand (*Stone & Hilborn, 2000*). Selon (*Arnold et al., 1989*), l'impact des gouttes de pluie brise les agrégats et disperse les particules de sol, les rendant plus sensibles à l'érosion.

De plus, si l'infiltration est réduite pendant les précipitations en raison du compactage, de la formation de croûtes ou du gel, les taux de ruissellement augmentent généralement.

Le potentiel d'érosion par les précipitations est un terme générique pour l'érosivité (*Bergsma et al., 1996*). Ce paramètre est lié à l'intensité de l'averse et aux propriétés des gouttes de pluie (taille, vitesse, forme et angle d'impact) qui déterminent l'énergie cinétique (*Riezebos & Epema, 1985*). La force du vent empêche les gouttes de pluie d'augmenter leur énergie

cinétique. Trois jours de bruine ont moins d'impact qu'une heure de fortes pluies avec des vents de 50 km/h (Poesen, 1985).

5.2. La topographie

Premièrement, la topographie fait référence à la pente du terrain. Les pentes accélèrent l'écoulement de l'eau, accélérant ainsi l'érosion (Agricoles, 2007). Les pentes entravent les phénomènes d'érosion en fonction de leur forme, de leur pente et de leur longueur (Fox & Bryan, 2000; Roose, 1994).

En effet, plusieurs études ont montré que l'énergie cinétique et la force d'érosion du ruissellement augmentent avec la pente. De plus, des mesures au mètre carré et des simulations sous précipitations naturelles montrent que l'érosion diffuse augmente significativement lorsque la pente passe de 2 % à 8 % (Chaplot & Le Bissonnais, 2000).

5.3. La lithologie

Les lithologies jouent un rôle important dans le ruissellement, l'infiltration, l'érosion et le transport des sédiments. Les matériaux géologiques sont classés en couches meubles (sable, argile, marne) et couches solides (par exemple, grès, calcaire, dolomite) (Toumi et al., 2013).

L'érodabilité du sol décrit sa susceptibilité aux processus d'érosion. Elle dépend des propriétés physico-chimiques du sol (texture, profondeur, porosité, teneur en matière organique, etc.) et des forces de cohésion qui existent entre ces particules. Une faible cohésion est associée à une forte érosion (Govers, 1987; Poesen & Govers, 1990).

La matière organique du sol méditerranéen est faible en raison de la faible productivité des plantes, des températures chaudes et de la rareté de l'eau. Ces conditions accélèrent la minéralisation de la matière organique du sol et favorisent la formation d'une croûte fragile, faiblement structurée, compressible et sommitale. Par conséquent, ces sols sont souvent sensibles à l'érosion (Ali, 2007).

5.4. La végétation

Le couvert végétal est un élément essentiel de protection du sol contre l'érosion, sans lequel le sol est directement exposé à la pluie. Cependant, c'est la végétation au sol et la litière de feuilles plutôt que la canopée qui sont examinées pour déterminer si les arbres protègent efficacement le sol (Roose, 1977).

Selon (*De Vente et al., 2005*) le type de couvert végétal joue un rôle important dans le processus d'érosion de plusieurs manières. La végétation protège le sol et a un effet positif sur la structure du sol et sa capacité d'infiltration.

(*Roose, 1994*) ont constaté que l'érosion n'est pas seulement fonction du couvert végétal, mais aussi de la hauteur au-dessus du sol. L'érosion est minime, car les altitudes inférieures offrent plus de protection.

5.5. Les activités humaines

Les activités humaines qui ont le plus grand impact sur l'érosion des sols sont l'agriculture, l'élevage, l'exploitation minière, l'exploitation forestière, la construction de routes et l'urbanisation. Les activités de construction peuvent avoir le plus grand impact à travers l'enlèvement de la végétation, les changements topographiques et le déséquilibre du sol. Les influences anthropiques incontrôlées telles que les incendies, les défrichements, la déforestation et le surpâturage sont à l'origine de processus qui augmentent l'intensité de l'érosion des sols (*Le Bissonnais et al., 2002; Ouvry, 1990; Rachman et al., 2003*).

Partie 02

*Cartographie, méthodes utilisées et quelques
études antérieures*

1. Introduction

Dans cette section, notre objectif est de présenter les différentes techniques utilisées pour mesurer et cartographier l'érosion hydrique. Au cours des dernières années, L'utilisation des Systèmes d'Information Géographique (SIG) a permis de développer de nombreux modèles pour évaluer la susceptibilité à l'érosion hydrique. Ces modèles sont regroupés en quatre catégories principales : les modèles empiriques, quantitatifs, qualitatifs et d'apprentissage automatique.

En somme, il existe différentes techniques pour mesurer et cartographier l'érosion hydrique, chacune ayant ses avantages et ses limites. Les modèles basés sur les SIG offrent une solution efficace pour évaluer la susceptibilité à l'érosion hydrique et prendre des décisions éclairées en matière de gestion des sols et des ressources en eau.

2. Quelques définitions

2.1. Système d'information géographique (SIG)

Un système d'information géographique est un outil utilisé par les ordinateurs pour représenter et analyser tout ce qui existe sur Terre et tout événement qui s'y produit (*Ersi, 2022*).

Le SIG permet de stocker, de manipuler et d'analyser des données géographiques de différents types, telles que des cartes, des images satellites, des photographies aériennes, des modèles numériques de terrain, des données climatiques, géologiques, sociales et économiques, etc. Ces données peuvent être superposées, combinées et analysées pour fournir des informations précieuses sur les tendances, les modèles et les relations spatiales.

Les SIG sont utilisés dans de nombreux domaines, notamment l'urbanisme, l'environnement, l'agriculture, la gestion des ressources naturelles, la géologie, la santé, les transports, l'aménagement du territoire, la défense et la sécurité, etc. Ils sont particulièrement utiles pour la prise de décision, la gestion des crises, la planification spatiale et la communication des résultats.

2.2. Carte d'inventaire

Cartes thématiques élémentaires ou dérivées construites à partir de données qualitatives ou quantitatives collectées sur le terrain : enquêtes, recensements, sondages, etc. (*DE CARTOGRAPHIE, 1970*).

Les cartes thématiques sont un outil clé pour visualiser, analyser et communiquer des données géographiques. Elles peuvent être utilisées pour représenter une grande variété de données, allant des données qualitatives aux données quantitatives, et peuvent être construites à partir de différentes sources, notamment des enquêtes, des recensements, des sondages, des mesures sur le terrain et des données obtenues par des capteurs tels que les satellites.

2.3. Cartographie des risques

Selon (UNDRO, 1979) qui est le *Coordonnateur des Nations Unies pour les secours en cas de catastrophe*, la cartographie des risques est un processus essentiel pour identifier et afficher la variation spatiale des événements dangereux ou des conditions physiques, tels que les tremblements de terre potentiels, les plaines inondables, les sites de matières dangereuses, les zones climatiques, etc. Le but principal de cette cartographie est de fournir aux résidents des informations sur l'éventail des dommages possibles et les activités de prévention des catastrophes. Bien qu'elle ne puisse pas arrêter une catastrophe, son utilisation efficace peut contribuer à réduire l'ampleur de la catastrophe.

En somme, la cartographie des risques est une méthode essentielle pour identifier les zones à risque et pour aider les populations à se préparer aux catastrophes potentielles. L'utilisation de SIG facilite grandement la gestion et le traitement des données nécessaires pour cette cartographie, ce qui permet de mieux comprendre les risques et de prendre des mesures préventives pour réduire les conséquences négatives des catastrophes (Cornélis & Billen, 2001).

La cartographie des risques nécessite un ensemble de déclarations initiales sur la vulnérabilité ainsi que sur le danger. L'utilisation de systèmes d'information géographique informatisés facilite grandement la gestion et le traitement de ces données (SIG) (Cornélis & Billen, 2001).

2.4. Risque naturel

Selon (UNDRO, 1979), l'aléa naturel se réfère à la probabilité qu'un événement naturel dangereux se produise dans une zone donnée pendant une période de temps donnée. Les événements naturels tels que les ouragans, les inondations, les glissements de terrain, les séismes et les éruptions volcaniques peuvent tous causer des dommages considérables aux personnes, aux biens, aux infrastructures et aux économies locales. Il est donc crucial d'identifier et d'évaluer les aléas naturels potentiels afin de planifier et de mettre en œuvre des mesures de prévention et d'atténuation des risques.

2.5. Modèle numérique de terrain (MNT ou DEM)

Un MNT (*modèle numérique de terrain*) ou DEM (*Digital Terrain Model*) est une représentation numérique et mathématique de la hauteur de n'importe quel point de la surface de la Terre dans une zone géographique, dans un système de référence bien défini. Même les MNT représentés sous forme de triangles irréguliers présentent certains avantages (*Peucker et al., 1978*).

Un MNT ou modèle numérique de terrain est un outil essentiel en cartographie et en analyse géospatiale. Il permet de représenter numériquement la hauteur de chaque point de la surface terrestre dans une zone donnée. Cette représentation peut se faire selon différentes méthodes, y compris des modèles basés sur des triangles irréguliers, des modèles réguliers ou encore des modèles basés sur des nuages de points.

Même si les MNT représentés sous forme de triangles irréguliers peuvent sembler moins précis que les modèles réguliers, ils présentent néanmoins certains avantages. Selon *Peucker et ses collaborateurs (Peucker et al., 1978)*, ces modèles sont plus flexibles et plus adaptés pour la représentation des zones de relief abrupt et des changements brusques d'altitude. En effet, ils permettent une meilleure gestion des données, une réduction de la taille des fichiers et une plus grande précision pour les régions de relief complexe.

2.6. Aléa

Selon (*Julião et al., 2009*), la notion d'Aléa correspond à la probabilité qu'un phénomène ou une action potentiellement destructrice survienne dans une zone géographique donnée, sur une période de temps donnée. Il s'agit donc d'une estimation de la probabilité de survenue d'un événement naturel ou anthropique qui pourrait avoir des conséquences néfastes sur les personnes, les biens et les infrastructures de la zone concernée.

La notion de d'aléa est liée à la notion d'aléa naturel ou anthropique, qui désigne la probabilité qu'un phénomène naturel ou une action humaine potentiellement dangereuse se produise dans une zone spécifique. Cependant, le danger va au-delà de la simple évaluation de la probabilité de survenue d'un événement en prenant en compte les caractéristiques de la zone concernée et l'ampleur des conséquences potentielles.

2.7. Susceptibilité

Selon (Julião et al., 2009), la notion de "susceptibilité" renvoie à la probabilité qu'une zone donnée soit affectée par des phénomènes dangereux, en fonction de critères spécifiques tels que des indicateurs de terrain, des conditions climatiques et des facteurs géologiques. Il est important de souligner que la susceptibilité ne prend pas en compte la période de récurrence ou la probabilité de l'occurrence de ces phénomènes dangereux.

2.8. Vulnérabilité

La vulnérabilité est une notion qui mesure la capacité d'un élément ou d'un groupe d'éléments exposés à subir des dommages ou des pertes en cas de survenance d'un phénomène dangereux (Julião et al., 2009). Elle est généralement déterminée par des facteurs tels que la qualité des infrastructures, la résilience des communautés, le niveau d'éducation et le niveau socio-économique, entre autres.

2.9. Risque

La probabilité qu'un phénomène dangereux (aléa) se produise et son estimation correspondante des conséquences pour les personnes et les biens ou l'environnement, exprimée en termes de dommages corporels directs ou indirects et/ou de dommages physiques et fonctionnels (vulnérabilité) (Julião et al., 2009).

La mesure de cette probabilité repose sur la connaissance de l'aléa, c'est-à-dire l'évaluation de la fréquence et de l'intensité probables d'un phénomène dangereux. La vulnérabilité, d'autre part, est la mesure dans laquelle un élément ou un groupe d'éléments exposés est susceptible d'être affecté en cas d'aléa.

2.10. Logiciel R

R est un environnement intégré pour la manipulation de données, le calcul et la représentation graphique, mais ce n'est pas seulement un "autre" environnement statistique (tel que SPSS ou SAS), mais aussi un langage de programmation complet et autonome. R est un langage largement inspiré de S et Schème (Abelson & Sussman, 1996). S, à son tour, s'est inspiré de plusieurs langages, dont APL (autrefois un langage populaire pour les actuaires) et Lisp. Comme tous ces langages, R est interprété, c'est-à-dire qu'il a besoin d'un autre programme - l'interpréteur - pour exécuter ses commandes. En revanche, les programmes en langage compilé,

tels que C ou C++, sont d'abord convertis en code machine par un compilateur, puis exécutés directement par l'ordinateur (Vincent, 2012).

3. Classification des différentes méthodes de la cartographie de la susceptibilité

La cartographie de la susceptibilité à l'érosion hydrique est une tâche importante pour la gestion des risques naturels et la préservation de l'environnement. Dans cette section, nous allons explorer les différentes méthodes utilisées pour évaluer et cartographier les zones à risque en utilisant les systèmes d'information géographique (SIG).

Ces méthodes ont été développées à partir d'articles et de recherches antérieures et peuvent être classées en quatre catégories principales : les méthodes qualitatives, semi-quantitatives, quantitatives et les modèles d'apprentissage automatique.

3.1. Approches qualitatives

Les méthodes qualitatives ou méthodes « expertes » (Leroi, 1996) reposent sur les avis d'experts chargés d'évaluer l'aléa. En général, les données sont recueillies sur place à l'aide de documents existants et de photographies aériennes (topographiques, géomorphologiques, géologiques, etc.). En outre, l'utilisation des technologies spatiales se développe. Deux méthodes peuvent être détaillées ci-dessous :

3.1.1. La cartographie d'inventaire

Une cartographie d'inventaire rapidement mise en œuvre est considérée comme une base fondamentale pour toute autre évaluation dans le bassin versant, mais ne supporte pas une échelle de travail spécifique (Van Westen, 2000). Cela nécessite des recherches sur le terrain, l'interprétation de photographies (diachroniques ou non), la collecte et l'analyse de documents historiques, et l'examen des récits de témoins oculaires susceptibles de fournir des informations sur la nature du phénomène, de l'événement ou de l'activité. Enfin, une carte de la distribution spatiale du phénomène est produite (Thiery, 2007).

Un système d'information géographique (SIG) est utilisé comme outil cartographique fondamental (Bernardi & Bocconcino, 2005; Duman et al., 2005).

3.1.2. L'analyse géomorphologique

Cette méthode est également connue sous le nom de méthode de cartographie directe ou « experte » (« méthode de cartographie directe ») (Cardinali et al., 2002; Soeters & Van Westen, 1996). Un géomorphologue sur le terrain définit directement le risque par une analyse simple

basée sur son expérience, et elle désigne par analogie les régions à risque élevé, modéré, faible ou non dangereux. Les frontières entre les catégories sont définies par des experts (Thiery, 2007).

Il est difficile de reproduire les résultats d'un site à l'autre car chaque zone morphologiquement distincte nécessite de vérifier, d'ajuster et de corriger les critères implicites et "subjectifs" considérés. Par conséquent, la méthode est mise à jour pour chaque domaine de recherche.

Récemment, quelques essais de cartographie 'experte' réalisées sous SIG se basant sur des règles de combinaisons de polygones recodés ont été proposés notamment par (Bunza, 1996) et (Van Westen et al., 2003). La méthodologie donne de bons résultats mais elle reste soumise à un contrôle de l'information obtenue pour tous les polygones uniques recodés. Les SIG sont alors utilisés comme simple outil de cartographie (Thiery, 2007).

3.2. Approches semi-quantitatives

Qui tendent à atténuer la subjectivité des experts (Thiery, 2007). On peut citer deux méthodes :

3.2.1. Logiques floues (Fuzzy logics)

Les Logiques floues (Zadeh, 1965) intéressent actuellement toutes les sciences qui ressentent le besoin de formaliser des méthodes empiriques ou expertes et de généraliser des modes de raisonnement sur des phénomènes complexes (Agterberg et al., 1990). Les fondements théoriques sont basés sur les idées créées par Zadeh en 1965 et améliorées plus tard par (Zimmermann & Zysno, 1980). La théorie des logiques floues a été développée en réponse à la prise de conscience que la plupart des phénomènes ont des limites imprécises ou sont sujets à des connaissances incomplètes, ce qui rend difficile leur représentation par des valeurs binaires de 0 ou 1 pour les variables booléennes (Burrough et al., 2015). L'idée repose sur les trois étapes suivantes :

- **Quantification floue des facteurs (Fuzzyfication)** : Cela implique de donner à la classe de chaque facteur une valeur d'appartenance entre 0 et 1 (il n'existe pas de formule fixe pour déterminer la valeur à attribuer en fonction de la classe du facteur). L'expertise du site d'étude et du phénomène sont fréquemment utilisés dans les procédures empiriques pour définir les scores d'appartenance (An et al., 1991; Carranza & Hale, 2001).

- **Intégration des valeurs d'appartenance** : Les cinq opérations suivantes sont utilisées pour combiner diverses valeurs d'appartenance : l'opérateur OU (OR), l'opérateur ET (AND), l'opérateur SOMME (SUM), l'opérateur PRODUIT (PRODUCT) et l'opérateur GAMMA (γ) (Thiery, 2007).
- **Defuzzification** : le calcul donne une fonction d'appartenance finale qui pour être analysée doit être transformée en valeur. Cette transformation (defuzzification) s'effectue : par centre de gravité ; par la méthode du maximum ; par le minimum du plateau 'à gauche' ; par le maximum du plateau 'à droite'. En pratique, les deux premières sont utilisées majoritairement (El-Shayeb, 1999).

3.2.2. Méthode du Processus de hiérarchie analytique (AHP)

Pour cartographier le risque, Saaty a créé en 1980 (Saaty, 1980) un modèle semi-quantitatif basé sur une méthode d'analyse multicritère hiérarchique utilisée par plusieurs chercheurs pour évaluer le risque d'érosion hydrique (CORREIA, 2007) et la probabilité de glissements de terrain (Achour et al., 2017; Hadji et al., 2018; Ramos et al., 2014). Cette approche peut combiner des facteurs d'érosion (érodabilité des sols, perméabilité des roches, pente, utilisation des terres, précipitations, etc.) et des facteurs de glissement de terrain (lithologie, pente, utilisation des terres, précipitations, drainage et exposition des pentes). Pour identifier cette étude, nous avons suivi la procédure suivante (Charbel & Hassan, 2016) :

a. Adopter une méthode d'analyse hiérarchique multicritère.

b. Classez les facteurs d'érosion et de glissement de terrain sous la forme d'un indice de sensibilité et attribuez des valeurs numériques à chaque niveau dans l'ordre (très faible = 1, faible = 2, moyen = 3, élevé = 4, très élevé = 5) tracez différemment carte thématique des facteurs. Cependant, cette classification nécessite un avis d'expert pour être validée.

c. Combiner les facteurs représentatifs du modèle dans l'outil "Model Builder" du logiciel ArcGIS pour créer des cartes de susceptibilité aux glissements de terrain et à l'érosion des sols.

3.3. Approches quantitatives

Les méthodes quantitatives sont basées sur les relations statistiques entre chaque facteur et les phénomènes observés (passés et présents). Cette méthode a gagné en popularité dans les années 1980 grâce à la création d'outils informatiques (PC et SIG), qui ont permis de

stocker de grandes quantités de données et d'élargir le champ des calculs complexes. Cependant, cette technique est employée dans des domaines comme la géographie, la topographie, la géologie et même les mathématiques appliquées depuis le début des années 1990. Les méthodes bivariées et multivariées sont les deux principales techniques qui ont été définies dans le domaine de la cartographie générale au cours des 15 dernières années (Thiery, 2007).

3.3.1. Méthode du rapport de fréquence (FR)

La méthode FR représente une technique quantitative et statistique bivariée utilisée dans divers domaines (Amare et al., 2021), telle que la cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain (Pham et al., 2021), et la cartographie de la susceptibilité de l'érosion en ravines (Amare et al., 2021).

L'idée fondamentale qui sous-tend cette approche est que les futurs de l'érosion en ravines se produiront dans des endroits présentant les mêmes conditions géographiques que ceux du passé ; la méthode est basée sur la relation observée entre la distribution de l'érosion en ravines et les facteurs individuels induits par l'érosion en ravines.

Afin de déterminer le rapport de fréquence pour chaque classe de facteurs (à l'aide de l'équation (1)), le rapport entre l'occurrence et la non-occurrence de l'érosion en ravines a été calculé.

$$FR = \frac{E/F}{M/L} \quad (1)$$

Où E est le nombre de pixels touchés par l'érosion hydrique pour chaque facteur, F est le nombre total de pixels touchés par l'érosion hydrique dans la zone entière, M est le nombre de pixels dans la zone de classe et L est le nombre total de pixels (Rahmati et al., 2016).

Les poids de chaque facteur ont été obtenus, et en résumant leurs poids, l'indice de la susceptibilité de l'érosion en ravines (GSI) a été calculé avec l'équation suivante l'équation (2) :

$$GSI = \sum FR_i \quad (2)$$

Où FR_i représente le rapport de fréquence pour chaque facteur, et FR représente la zone où l'érosion en ravines s'est produite.

3.3.2. Modèle de régression logistique (LR)

La régression logistique, une méthode statistique multivariée quantitative et/ou catégorielle (Gorsevski et al., 2000). Cette approche a été couramment adoptée au cours des

dernières années pour créer une susceptibilité aux glissements de terrain (Hadji et al., 2014) et à l'érosion hydrique (Conoscenti et al., 2014), Il a été développé sous le SIG (Thiery, 2007).

Le modèle est écrit sous la forme mathématique la plus élémentaire possible :

$$P = \frac{1}{1+e^z} \quad (1)$$

Où P est la probabilité qu'un événement se produise. Sur la courbe sigmoïde, les probabilités passent de 1 à 0 lorsque Z varie de $-\infty$ à $+\infty$. Puisque Z est une combinaison linéaire, telle que :

$$Z = C_0 + C_1X_1 + C_2X_2 + \dots + C_nX_n \quad (2)$$

Où C_0 est la constante du modèle, n est le nombre de facteurs (lithologie, pentes...), C_i ($i = 1, 2, \dots, n$) est le coefficient du modèle et X_i ($i = 1, 2, \dots, n$) les 'mouvements de versant'. Un coefficient positif implique une relation supérieure à « la moyenne » entre le facteur et le phénomène. Un coefficient négatif signifie une corrélation inférieure à la « moyenne » (Atkinson & Massari, 1998).

3.3.3. Méthode d'USLE (Universal Soil Loss Equation)

La formule empirique de Wischmeier et Smith (Wischmeier & Smith, 1978) a été utilisée pour évaluer le taux de perte de sol (USLE). Il s'agit d'un modèle mathématique combiné à la technique SIG et est souvent utilisé dans le monde entier pour quantifier la perte de sol. Elle est basée sur cinq facteurs qui expliquent comment l'érosion hydrique se produit. Il s'agit de l'utilisation des terres, de l'érodabilité du sol, des facteurs topographiques combinés aux pentes et à la longueur des pentes, de l'agressivité du climat et des mesures antiérosives (Brahim, 2018).

La forme de cette équation est :

$$A \text{ (tonnes/ha/an)} = R * K * LS * C * P$$

- A (t/ha/an) : perte de sol par unité de surface et par an,
- R : indice pluviométrique caractérisant l'agressivité climatique,
- K : facteur d'érodabilité du sol,
- LS : un indice qui intègre les effets de la pente S et de la longueur de la parcelle L ,
- C : Index des coutumes culturelles,

- **P** : indice de développement de la résistance à l'érosion.

3.4. Modèles d'apprentissages automatiques (machine Learning models)

L'apprentissage automatique fait référence à la capacité d'un système à acquérir et à intégrer des connaissances de manière autonome. Ce concept englobe toutes les méthodes de construction de modèles de réalité à partir de données, soit en améliorant des modèles partiels ou moins généraux, soit en créant des modèles entièrement. L'apprentissage automatique fait référence au développement, à l'analyse et à la mise en œuvre de méthodes qui permettent (au sens large) aux machines d'évoluer et d'effectuer des tâches liées à l'intelligence artificielle par le biais d'un processus d'apprentissage. Cet apprentissage permet d'avoir un système optimisé en fonction de l'environnement, de l'expérience et des résultats observés (*Marref, 2013; Miclet & CornuØjols, 2010*).

Ces dernières années, l'apprentissage automatique est devenu une pratique courante en géologie, notamment pour étudier des phénomènes tels que l'érosion hydrique (*Roy et al., 2020*) et les glissements de terrain (*Achour & Pourghasemi, 2020*). À l'aide d'ArcGIS, nous générons des cartes de susceptibilité (*Achour et al., 2021*).

3.4.1. La forêt aléatoire (Random Forest)

Random Forest, appelée la forêt aléatoire en français, est un algorithme de classification et de régression supervisée des techniques d'apprentissage automatique (machine learning), qui repose sur le principe des arbres de décision et utilise des méthodes d'ensemble telles que le bagging. À titre d'illustration, la technique de bagging appliquée dans les forêts aléatoires consiste à itérer sur un grand nombre de sélections aléatoires et de substitutions sur un ensemble de données d'apprentissage, et à construire des règles de décision (arbres) sur chaque échantillon ainsi créé. L'ensemble des arbres (forêts) est ensuite combiné par des votes majoritaires conduisant à des prédictions (*Breiman, 2001; Corbonnois et al., 2014*). Une forêt aléatoire est un "classificateur" non paramétrique, c'est-à-dire qu'elle ne fait aucune hypothèse sur la distribution statistique (distribution normale) des données. Il convient à la classification des données de télédétection multi-sources (*Corbonnois et al., 2014*).

3.4.2. EXtreme Gradient Boosting

XGBoost est l'abréviation de package EXtreme Gradient Boosting. Il s'agit d'une implémentation efficace et évolutive du cadre de renforcement de gradient de (*Friedman et al., 2000; Friedman, 2001*). Le package comprend un solveur de modèle linéaire efficace et un

algorithme d'apprentissage d'arbre. Il prend en charge diverses fonctions objectives, notamment la régression, la classification et le classement. Le package est conçu pour être extensible, afin que les utilisateurs puissent également définir facilement leurs propres objectifs (*Chen et al., 2015*).

4. Un aperçu sur les études antérieures concernant l'érosion hydrique en Algérie et certains pays du monde et les méthodes utilisées pour l'évaluation

Le rapport sur l'état des ressources en sols dans le monde (*2015*) indique que l'érosion des sols est l'une des dix principales menaces affectant les sols. Il est défini comme l'élimination accélérée de la couche arable de la surface de la terre par l'eau, le vent et le travail du sol. L'érosion des sols se produit naturellement sous tous les climats et sur tous les continents, mais peut être considérablement accélérée (jusqu'à 1 000 fois) en raison d'activités humaines non durables, telles que l'agriculture intensive, la déforestation, le surpâturage et le changement inapproprié d'utilisation des terres (*Montanarella et al., 2015*).

Afin de lutter contre l'érosion hydrique, de nombreuses techniques ont été employées pour localiser les zones touchées dans le monde entier et évaluer le taux et la gravité de l'érosion. Les méthodes empiriques ont été les premières et les plus courantes à être adoptées, mais avec les progrès de la science et de la technologie, les techniques d'évaluation et de cartographie de l'érosion hydrique ont évolué. Aujourd'hui, les chercheurs se basent sur de nouvelles techniques basées sur les systèmes d'information géographique (SIG), les techniques d'apprentissage automatique et les techniques statistiques pour évaluer et cartographier la susceptibilité de l'érosion hydrique.

En somme, grâce à l'utilisation de techniques d'évaluation et de cartographie de l'érosion hydrique telles que les SIG, l'apprentissage automatique et les techniques statistiques, les chercheurs peuvent désormais mieux comprendre les zones susceptibles à l'érosion hydrique et prendre des mesures pour prévenir et atténuer les effets de cette menace.

L'Algérie

En Algérie, la plupart des études précédentes sur l'érosion hydrique ont utilisé des méthodes empiriques quantitatives telles que l'équation universelle de perte de sol (RUSLE, USLE) qui est un modèle à grande échelle développé par WISCHMIEIER et SMITH de l'USDA (ministère de l'agriculture des Etats-Unis) en 1960 et mis à jour en 1978. Parmi les études qui appliquent ce modèle en Algérie, on peut citer celles-ci (*BALLA, 2019; Meghraoui et al., 2017;*

Tani & Abdessalem, 2019), et la méthode du processus de hiérarchie analytique (AHP) un modèle semi-quantitatif créé en 1980 par SAATY. Ces modèles ont été appliqués à partir de données pluviométriques, de la lithologie, de la déclivité de la pente et de l'occupation des sols, qui ont été combinées, extraites et analysées à l'aide de l'ArcGIS pour identifier les zones à risque d'érosion hydrique.

Plusieurs études ont été menées en Algérie en utilisant ces modèles, on peut citer les suivantes :

- (Bouguerra et al., 2017) :

Dans le présent article, l'intégration du modèle de prévision de la perte de sol (RUSLE) dans le système d'information géographique (SIG) pour évaluer la distribution spatiale de la perte de sol à travers le bassin versant de Bouhamdane et de mettre en évidence les zones présentant une sensibilité critique à l'érosion hydrique. Les résultats indiquent que le bassin versant perd en moyenne $11.18 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{y}^{-1}$. Les résultats ont indiqué que l'érosivité des précipitations, l'érodabilité du sol et le facteur topographique sont les principaux facteurs à l'origine de l'érosion du sol dans la zone d'étude. En fait, la plupart des sols érodables présentant des classes de risque élevé et très élevé ont été trouvés dans les zones agricoles autour du réservoir de Hammam Debagh (Guelma) où des valeurs élevées de ces facteurs ont été estimées. Les systèmes de culture dans ces zones doivent être revus, la mise en œuvre de techniques alternatives telles que le terrassement et le billonnage peuvent aider à réduire les rendements en sédiments dans le réservoir de Hammam Debagh et à prolonger sa durée de vie.

- (Benselama et al., 2018) :

Le but de ce travail était d'évaluer la spatialisation du risque d'érosion hydrique dans le bassin versant de l'Oued-El-Maleh au Nord-Ouest de l'Algérie, en utilisant le modèle très répandu de l'équation RUSLE sous les techniques SIG. Il ressort de cette étude que l'érosion hydrique est omniprésente sur l'ensemble du bassin versant, avec un taux variable. L'érosion spécifique varie de 0 à 754 t/ha/an sur l'ensemble de la zone d'étude, avec une moyenne annuelle de perte de sol d'environ 9 t/ha/an. On peut également observer que la perte de sol varie en fonction de l'érosivité des précipitations et de la densité de la végétation. Plus les valeurs de l'érosivité R et de l'occupation des sols C sont élevées, plus les terres ne sont pas prédisposées à l'érosion hydrique. Les données de la station de jaugeage suggèrent que seulement 2,94 t/ha/an, soit environ 32,6% du taux total de sédiments érodés mesuré par RUSLE, ont été

transportés par le ruissellement jusqu'à l'exutoire du bassin versant. Cette valeur est différente de celles obtenues dans de nombreux bassins versants semi-arides en Algérie. Cette différence est due à la faible pente et au couvert végétal dense du bassin versant de l'Oued-El-Maleh.

- (Mihi et al., 2020) :

Pour cette étude, deux bassins versants, Oued-Meleque et Chott-Melrhir, sont des zones typiques d'érosion hydrique due à de nombreux facteurs d'érosion (changement climatique, géologie, topographie, couverture végétale et conditions du sol). Pour combattre, atténuer et prévenir ce phénomène de dégradation, il est important de définir le degré de risque d'érosion hydrique et les facteurs qui le contrôlent. La production de cartes précises du risque d'érosion hydrique aide les décideurs à adopter les meilleures stratégies dans les projets de réhabilitation des terres et de contrôle de l'érosion. L'objectif principal de cette étude est d'estimer quantitativement la sensibilité de l'ensemble de la région de Tébessa à l'érosion des sols dans ce contexte (NE Algérie), en utilisant le modèle USLE/RUSLE intégrant les techniques géo spatiales (SIG et télédétection) et la méthodologie AHP.

Ces études ont permis de déterminer les zones à risque d'érosion hydrique en Algérie et de mettre en évidence les facteurs qui contribuent à ce phénomène. Elles ont également permis d'identifier les techniques alternatives pour réduire les rendements en sédiments dans les réservoirs et prolonger leur durée de vie.

L'Iran

Les chercheurs iraniens, comme d'autres chercheurs mondiaux, se sont appuyés au début des années 2000 sur les méthodes empiriques quantitatives (RUSLE et USLE) pour estimer et calculer le taux de l'érosion hydrique en Iran, parmi ces études :

- (Vaezi et al., 2008) :

Cette étude examine les données des parcelles d'érosion sur le terrain avec des sols calcaires sous des précipitations naturelles dans le Nord-Ouest de l'Iran pour déterminer la valeur de K ; reconnaître les propriétés physico-chimiques du sol qui affectent K ; et développer un modèle d'estimation de K basé sur les propriétés physico-chimiques facilement mesurables des sols calcaires.

Ces dernières années, les chercheurs iraniens ont intégré des modèles statistiques et l'apprentissage automatique dans leurs études scientifiques modernes avec l'utilisation du SIG

et de la télédétection, ce qui a contribué à faciliter l'identification des zones susceptibles à l'érosion hydrique et l'extraction de cartes de susceptibilité à l'érosion hydrique. On peut citer quelques études:

- (Arabameri et al., 2018b):

L'objectif majeur de cette étude est d'appliquer un modèle d'ensemble bivarié (EBF) et multivarié (LR) comme nouvelle approche dans le bassin versant de (Toroud en Iran) pour identifier les zones à risque d'érosion en ravines. Les résultats contribueraient au développement durable de cette zone et minimiseraient les pertes de sol et économiques.

- (Avand et al., 2019) :

Les objectifs de cette recherche sont de modéliser la susceptibilité à l'érosion en ravines à l'aide de deux techniques d'exploration de données célèbres, à savoir (RF) et (KNN), afin de déterminer l'importance des facteurs géo environnementaux / de conditionnement pour la cartographie de la susceptibilité à l'érosion en ravines, et enfin de fournir une ligne directrice applicable aux parties, prenantes réduire les dommages causés par l'érosion en ravines dans la zone d'étude. L'essentiel de la recherche est l'application des méthodes basées sur les données (RF) et (KNN) pour la cartographie de la susceptibilité de l'érosion en ravines, afin de comparer les deux modèles pour la première fois.

- (Arabameri et al., 2019a) :

Une nouvelle approche dérivée de l'intégration de la technique GWR avec les méthodes d'exploration de données statistiques bivariées CF et RF est utilisée pour prédire les zones sujettes à l'érosion en ravines dans la zone d'étude.

La Chine

Les approches suivies en Chine pour étudier l'érosion hydrique sont largement adoptées comme référence pour de nombreuses études en cours et de nouveaux articles, car la Chine est l'un des pays asiatiques les plus touchés par ce phénomène, surtout ces dernières années (TENG et al., 2019).

Divers modèles ont été développés pour évaluer l'érosion locale en Chine, comme :

- (TENG *et al.*, 2019) :

Le but de cette étude est de quantifier l'érosion des sols en Chine à l'aide de RUSLE. Toutes les données utilisées pour calculer les facteurs d'érosion sont les données les plus détaillées et accessibles au public pour la Chine. Les taux d'érosion les plus élevés se produisent principalement dans le Sud-Ouest de la Chine, tandis que les régions désertiques ont montré les taux d'érosion les plus faibles. Plus de 60% de la superficie totale de la Chine est affectée par l'érosion des sols dans une mesure limitée. Les terres inutilisées et les autres forêts boisées ont les taux d'érosion les plus élevés, tandis que les forêts, les zones humides et les rizières ont les taux d'érosion les plus faibles. RUSLE est utile pour comprendre et évaluer le potentiel d'érosion des sols sur de vastes zones avec peu de données. En tant qu'estimation la plus quantitative du potentiel d'érosion des sols avec des données accessibles au public en Chine, ces estimations peuvent soutenir la politique nationale et régionale concernant la dégradation des terres en Chine.

- (Yang *et al.*, 2021) :

Cette étude a exploré la méthode de cartographie de la susceptibilité à l'érosion en ravines dans un bassin versant avec un terrain très complexe dans le plateau de Loess en Chine. Trois modèles d'apprentissage automatique couramment utilisés ont été utilisés, parmi lesquels la précision de prédiction de (XGBoost) est supérieure à celle de (RF) et (GBDT). Selon l'importance caractéristique des facteurs d'influence, le gradient de pente, l'utilisation des terres et l'altitude étaient les facteurs les plus importants pour la cartographie de l'érosion en ravines. Combiner le poids de la preuve et le modèle de classification d'apprentissage automatique est un moyen informatique efficace et interprétable pour mettre en œuvre la cartographie de la susceptibilité de l'érosion en ravines.

Le Brésil

Le Brésil a connu une augmentation marquée de l'érosion hydrique avec une déforestation accrue depuis 1991, avec environ 27 772 kilomètres carrés de forêt amazonienne supprimés en 2004, selon l'Institut national brésilien de recherche spatiale (INPE) (Brovelli *et al.*, 2020).

Pour calculer le taux d'érosion hydrique au Brésil, de nombreuses approches et méthodes ont été utilisées pour estimer le taux d'érosion hydrique, déterminer ses localisations et ses

causes, et tenter de trouver des solutions appropriées pour le réduire. Parmi les études publiées dans ce contexte, nous citons ce qui suit :

- (Lu et al., 2004) :

Cette étude fournit une approche pour l'évaluation du risque d'érosion des sols en Amazonie brésilienne basée sur une combinaison de RUSLE, de télédétection et du SIG. Il s'agit d'un moyen efficace de cartographier la répartition spatiale des risques d'érosion des sols sur une vaste zone. Les méthodes et les résultats décrits dans cet article sont précieux pour comprendre la relation entre le risque d'érosion des sols et les classes LU/LC, et sont utiles pour gérer et planifier l'utilisation des terres qui évitera la dégradation des terres. Pour l'Amazonie brésilienne, ces sujets sont très importants en raison des activités actuelles impliquant la conversion des forêts vers d'autres couvertures terrestres.

- (Galdino et al., 2016) :

Dans cette étude, le relief a été le facteur qui a le plus influencé la variation de la perte de sol en 2009 dans les zones de pâturage du Goiás et FD. L'analyse des effets de différents scénarios d'utilisation des terres et des pratiques de gestion et de conservation sur les taux d'érosion dans les zones de pâturage du Goiás et de la DF, souligne l'importance des actions axées sur la récupération des pâturages dégradés dans le biome du Cerrado. Une augmentation de 709 % de l'érosion des sols par le taux d'eau peut être attendue si les pâturages sont mal gérés et qu'aucune pratique de conservation n'est adoptée (scénario critique), par rapport à une condition dans laquelle les pâturages sont bien gérés, les terrasses sont utilisées et les pentes plus raides sont conservées pour la végétation naturelle (scénario idéal). L'adoption de bonnes pratiques de gestion améliorera la qualité des pâturages dégradés, augmentera la productivité du bétail et réduira la pression pour ouvrir de nouvelles zones pour l'expansion des cultures vivrières et énergétiques. La modélisation de la perte de sol à l'aide des géo-technologies s'est avérée être un outil important pour l'aménagement du territoire et soutenir les politiques publiques d'utilisation durable des ressources naturelles.

5. Conclusion

Le premier chapitre de notre étude est d'une importance cruciale pour comprendre le phénomène de l'érosion, qui est un problème environnemental majeur dans le monde entier. Dans la première partie, nous avons présenté une introduction générale sur l'érosion, en soulignant ses différents types, tels que l'érosion éolienne, l'érosion hydrique. Nous avons également discuté des facteurs qui contribuent à l'érosion, tels que le climat, la topographie, la végétation et les activités humaines. En outre, nous avons approfondi l'érosion hydrique, qui est causée par l'action de l'eau, en mentionnant ses différents types, tels que l'érosion par ruissellement, l'érosion en nappe et l'érosion souterraine. Nous avons également abordé les facteurs qui motivent l'érosion hydrique, tels que les précipitations, la pente, la texture du sol et la couverture végétale.

Dans la deuxième partie, nous avons abordé les techniques et les approches utilisées pour cartographier la susceptibilité à l'érosion hydrique et évaluer les risques associés à l'aide de systèmes d'information géographique (SIG). Nous avons discuté des avantages de l'utilisation de SIG dans la cartographie de la susceptibilité à l'érosion hydrique, tels que la possibilité de combiner et de manipuler de grandes quantités de données spatiales et non spatiales. Nous avons également présenté les différentes méthodes utilisées pour évaluer la susceptibilité à l'érosion hydrique, telles que la méthode USLE, qui est basée sur des équations mathématiques, la méthode de la logique floue, qui utilise des données de terrain et des données SIG, et la méthode basée sur des modèles de terrain, qui utilise des données de télédétection.

Enfin, dans la dernière partie de ce chapitre, nous avons passé en revue les études antérieures qui ont été menées sur l'érosion hydrique en Algérie et dans d'autres pays du monde. Nous avons examiné les résultats de ces études et les différentes approches qui ont été utilisées pour cartographier la susceptibilité à l'érosion hydrique dans ces régions. Nous avons également souligné les lacunes dans les études précédentes et la nécessité de mener davantage de recherches sur l'érosion hydrique pour mieux comprendre et prévenir ce phénomène dans ces régions.

Chapitre 02

Description générale de la région d'étude

Partie 01

Représentation géologique et morphologique

1. Introduction

Le Nord de l'Algérie est découpé en plusieurs données géographiques et géologiques, dont 17 bassins versants, eux-mêmes divisés en sous-bassins contenant notre zone d'étude, représentés par le bassin versant du K'sob.

Après avoir établi le contexte géographique et géologique du Grand Bassin du Hodna, nous proposons dans ce chapitre une description générale de la géographie physique, de la géologie, des propriétés du sol et de la couverture végétale du bassin versant du K'sob.

2. Généralités sur le bassin versant du Hodna

2.1. Situation géographique

Le bassin versant du Hodna est l'un des bassins les plus importants d'Algérie, et c'est le cinquième bassin versant dans l'Algérie. Il se situe dans la patrie Nord de l'Algérie entre les longitudes $3^{\circ}9'24''$ et $6^{\circ}26'17''$ et les latitudes $34^{\circ}29'22''$ et $36^{\circ}16'37''$.

Il est situé à 150 km au Sud de la côte méditerranéenne au centre de l'Algérie. Sa superficie est de 26000 km^2 et il comprend 7 wilayas : M'sila, Batna, Bordj-Bou-Argeridj, Djelfa, Médéa, Bouira et Sétif (*Fig.15*).

Le bassin versant du Hodna est caractérisé par un climat semi-aride avec des températures élevées et de faibles précipitations associées à une forte variabilité spatio-temporelle. Le bassin du Hodna enregistre une pluviométrie annuelle moyenne de 363 mm/an , et la pluviométrie journalière maximale est d'environ $36,6 \text{ mm}$ (*Djoukbala et al., 2022*).

Il est délimité par les monts des Bibans et le plateau sétifien au Nord, les hautes plaines algéroises à l'ouest et l'Atlas saharien au Sud et à l'Est. Le relief du bassin est caractérisé par une série de montagnes au Nord et au Sud autour d'une dépression naturelle appelée Chott-El-Hodna, à 400 m d'altitude par rapport au niveau de la mer, d'une superficie de 1150 km^2 , presque plate. Les sommets des monts du Hodna se décroissent d'Est en Ouest, oscillant entre 1900 et 1000 m d'altitude, tandis qu'au Sud, seuls quelques sommets de l'Atlas saharien atteignent 1200 m (*BENSAADALLAH Mebarka, 2020*).

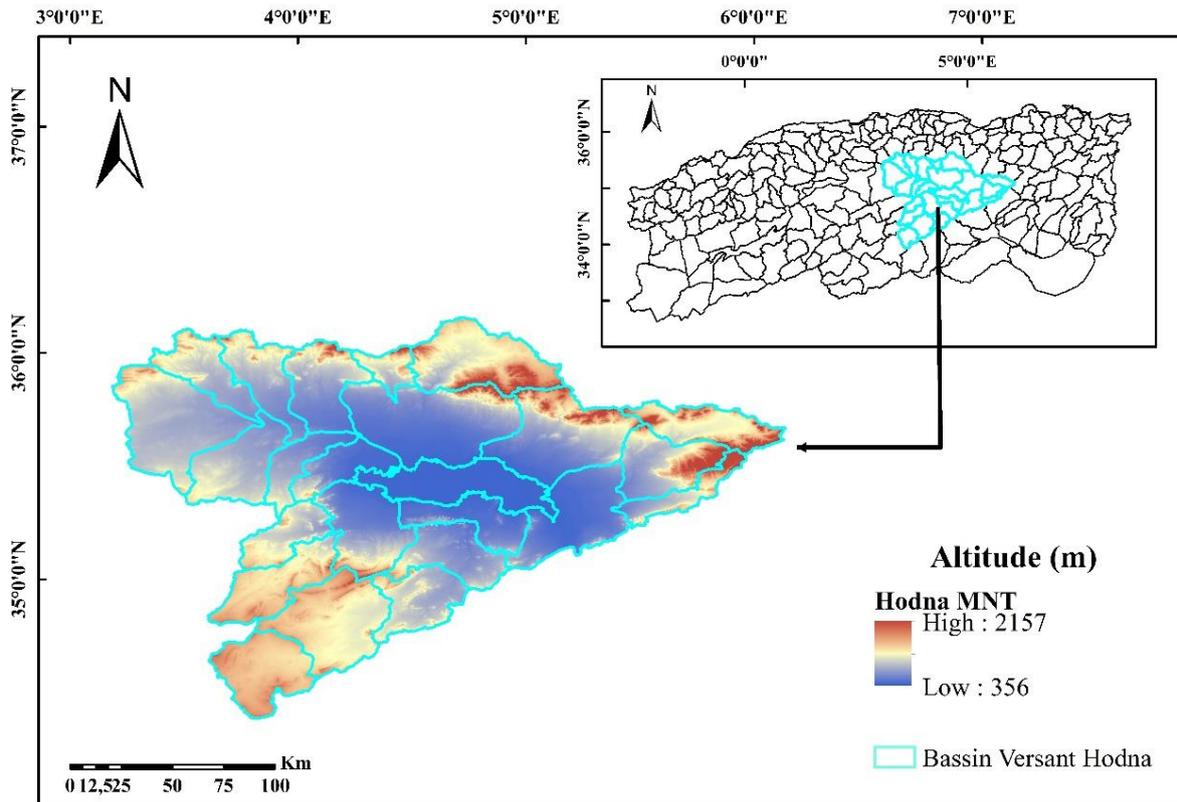


Fig.15. Carte de localisation et situation du bassin versant de Hodna.

Selon l'Agence nationale des ressources hydrauliques (ANRH), le bassin versant du Hodna peut être divisé en 24 sous-bassins.

2.2. Relief

Le relief est l'ensemble des irrégularités du sol liées au niveau de la mer. Ces reliefs forment des barrières naturelles et ont des rôles climatiques et hydrologiques importants. Le bassin du Hodna est divisé en quatre unités géomorphologiques : les montagnes, la plaine du Hodna, le Chott Sebkhia et la région de R'mel. A une altitude de 1400 à 1800 m, Chott Sebkhia relie l'Atlas du Sahara et le Sahara, et couvre une superficie de 100 km². La région du R'mel s'étend de Boussaâda (Wilaya de M'sila) à M'doukal (Wilaya de Batna) et présente un paysage de dunes de sable et de steppes sableuses (Sara, 2016) (Fig.16).

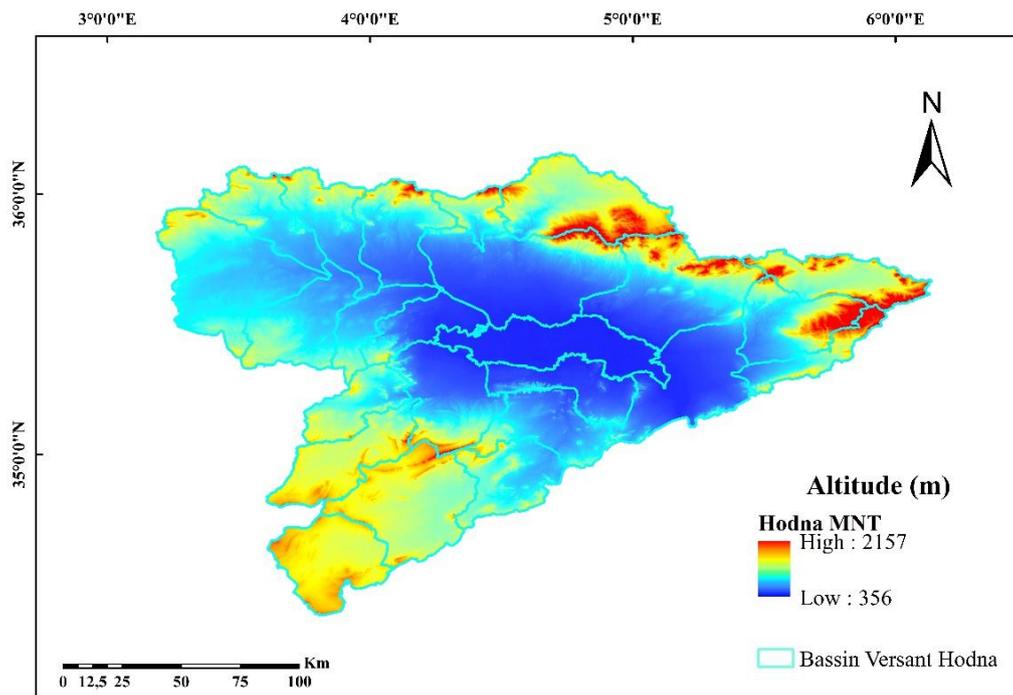


Fig.16. Le relief du bassin versant du Hodna.

2.3. Géologie :

La géologie du Hodna est complexe en raison de la situation du bassin au contact des Atlas tellien et saharien. En plus d'être importante pour la formation de la topographie, la matrice géologique joue également un rôle crucial dans la distribution du sol en tant que matériau du sol d'origine (roche mer).

La structure géologique du Hodna comprend des structures secondaires, tertiaires et quaternaires (BENSAADALLAH Mebarka, 2020; Sara, 2016). La description lithologique de Hodna est essentiellement issue des travaux de Savornin (Savornin, 1920) et Emberger (EMBERGER, 1964) (BENSAADALLAH Mebarka, 2020; Sara, 2016) (Fig. 17).

a. Trais : Dans les zones autour de la dépression du Hodna, les affleurements triasiques sont assez nombreux, mais seulement à certains endroits du bassin ; ils sont principalement composés d'argiles, de marnes et de minéraux de néoformation, de fragments calcaro-dolomiques et de roches volcaniques.

b. Jurassique et Carbonate : Il occupe des surfaces réduites du bassin.

c. Crétacé : Le crétacé inférieur montre une alternance de faciès marno-gréseux et argilo-gréseux de fortes épaisseurs.

d. Paléocène : Il se présente en deux types de formation :

-**Formations autochtones :** représentées par l'éocène de faciès marnes et gypses à passées jaunâtres dues à l'alternance de la pyrite.

-**Formations allochtones :** qui sont les terrains argilo-marno-gypseux d'âge éocène et oligocène emballée de façon anarchique au miocène.

e. Néogène : occupe une grande superficie du Hodna d'âge miocène inférieur et moyen (marnes grises) et pliocène (plaine de M'sila).

f. Quaternaire : est l'âge pendant lequel ont été formés les chotts salés des hauts plateaux et du Sahara. Le quaternaire ancien est présenté par des dalles calcaires conglomératiques surmontant localement des argiles sableuses roses. La structure tectonique actuelle des monts du Hodna s'est formée au cours de diverses phases tectoniques du système alpin de l'aire anticlinale de Meharga (sud de Chott), avec orientation Est-Ouest (épandages dépassants rarement 30°).

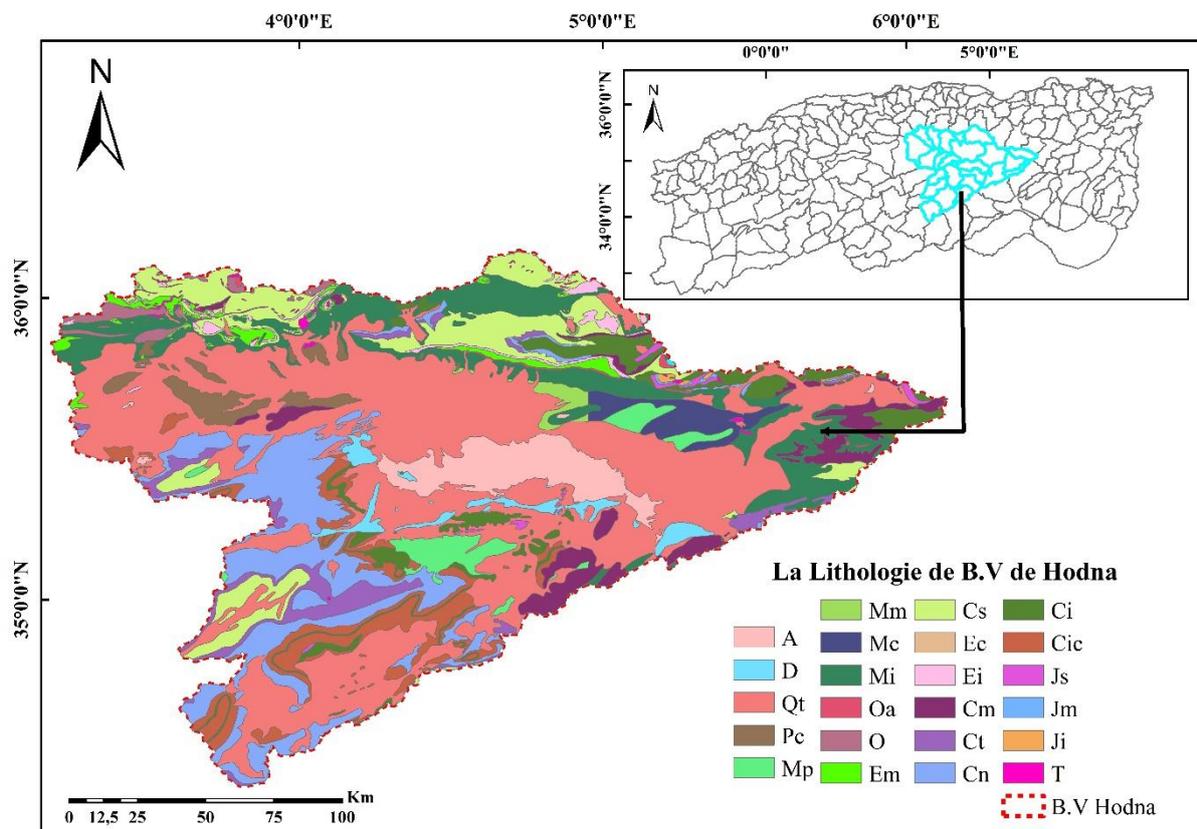


Fig.17. la Géologie du bassin versant du Hodna.

2.4. Climat

C'est un ensemble de conditions météorologiques pour une région, caractérisées par plusieurs paramètres climatiques qui sont les déterminants de l'écoulement : la pluviométrie, la température, le vent et l'humidité (Sara, 2016).

2.4.1. Pluviométrie

Est un générateur de flux dont l'analyse nécessite de comprendre l'état du réseau de mesure et de collecte de données (Fig.18). Selon la classification climatique gaussienne, presque tous les sites du bassin du Hodna sont de type aride. Ainsi, Barika a 9 mois secs et M'sila et Bou-Saada ont 10 mois. Seule la station de Bordj-Bou-Arredidj dans le haut bassin de l'Oued Ksob a un caractère méditerranéen (Kebiche, 1994).

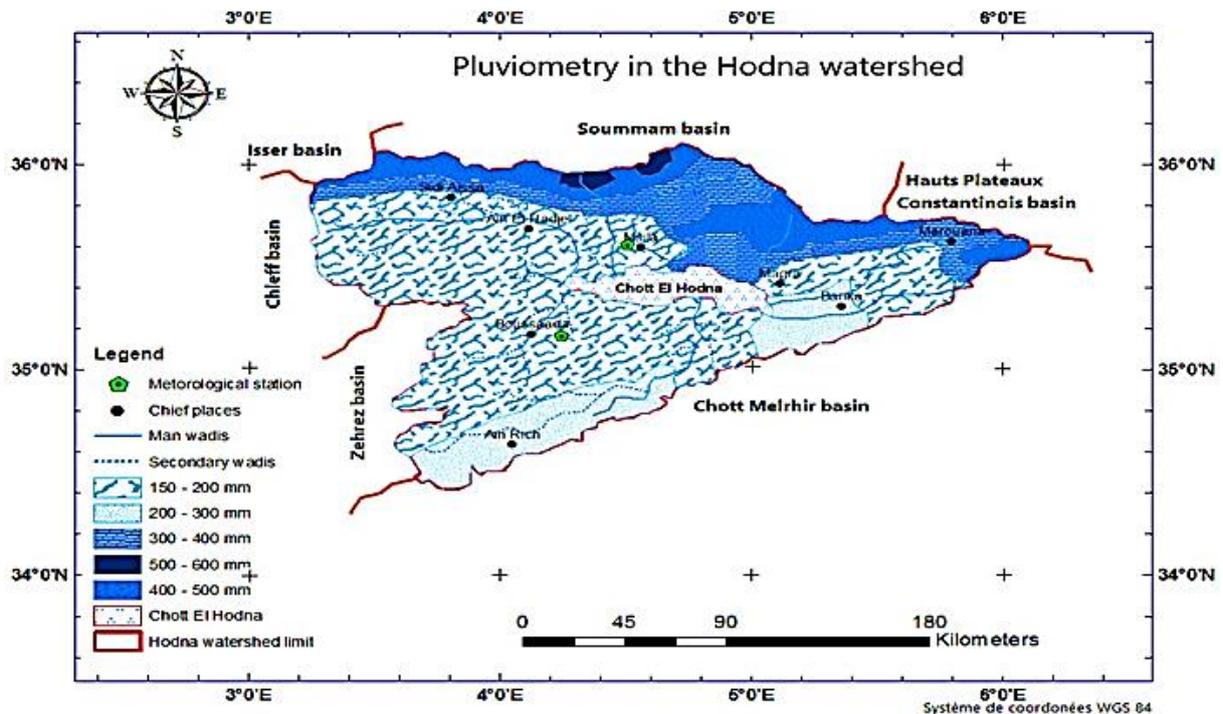


Fig.18. Pluviométrie dans le bassin versant du Hodna (KHOUDOUR et al., 2021).

2.4.2. Température

Dans le bassin du Hodna, les températures maximales moyennes suivent généralement une distribution géographique : entre 24°C et 27°C dans les plaines, et entre 19°C et 21°C dans les hautes terres. La température minimale moyenne varie entre 9°C et 12°C et entre 6°C et 9°C dans les plaines et les hautes terres, respectivement. Le gradient thermique annuel en fonction de l'altitude est de 0,75°C par 100 m de dénivelé, alors que l'Algérie accepte un gradient moyen de 0,55°C/100 m (Bouteldja, 2005).

2.4.3. Vent

Les vents dominants sont d'Ouest et de Nord-Ouest pendant l'hiver, et en été les vents deviennent du Sud (sirocco), variant de 25 à 34 jours par an (*Bouteldja, 2005*).

2.4.4. Humidité

Le bassin du Hodna est caractérisé par un climat méditerranéen semi-aride. Précipitations en automne, hiver et printemps, avec de fréquentes averses printanières produisant de violentes inondations, parfois accompagnées de grêle. Importante sécheresse d'été avec des précipitations irrégulières dans l'espace et dans le temps (*Bouteldja, 2005*).

L'évapotranspiration potentielle annuelle selon la formule de Turc varie entre 1085 mm et 1362 mm ; pour la plupart des bassins elles sont d'environ 1250 mm. L'évapotranspiration potentielle annuelle calculée d'après la formule de Turc varie entre 1085 mm et 1362 mm ; pour la majeure partie du bassin elle est de 1250 mm environ. L'évaporation moyenne annuelle mesurée à la station M'Sila (bac classe A américain) après sa correction pour l'évaporation sur de grande surface libre est de 2120 mm (*Hedjazi, 2009*).

2.5. Couvert végétal

Les principaux massifs forestiers du bassin du Hodna sont les Djebels Messaâd (33 814 ha), Medjedel (16 321 ha), Slim (14 916 ha), Maâdid (6 448 ha), Hammam El-Dalaâ (16 819 ha) et Boussaâda (3 739 ha).

La plaine de M'sila est une zone agricole propice au maraîchage (15 125 ha), aux céréales (741 945 ha) et aux arbres fruitiers (14 170 ha) (*Mechri, 2008*).

3. Présentation de la zone d'étude

3.1. Situation géographique

Le bassin versant du K'sob est situé dans le grand bassin du Hodna au Nord de l'Algérie. Il s'étend sur la partie Sud de Bordj-Bou-Arreidj, et son exutoire se situe à l'extrémité Nord de la région de M'Sila (Fig.19). Il est limité au Nord et au Nord-Ouest par la chaîne de montagnes des Bibans ; au Sud et au Sud-Ouest par les monts du Hodna et à l'Est par les hauts plateaux de Sétif.

Géographiquement, il est situé aussi entre les méridiens de longitude $04^{\circ}28'37''\text{E}$ - $05^{\circ}10'00''\text{E}$ et les parallèles de latitude $35^{\circ}43'27''\text{N}$ - $36^{\circ}09'53''\text{N}$ (WGS_1984_UTM_31 N). Il couvre une superficie de 1570 km².

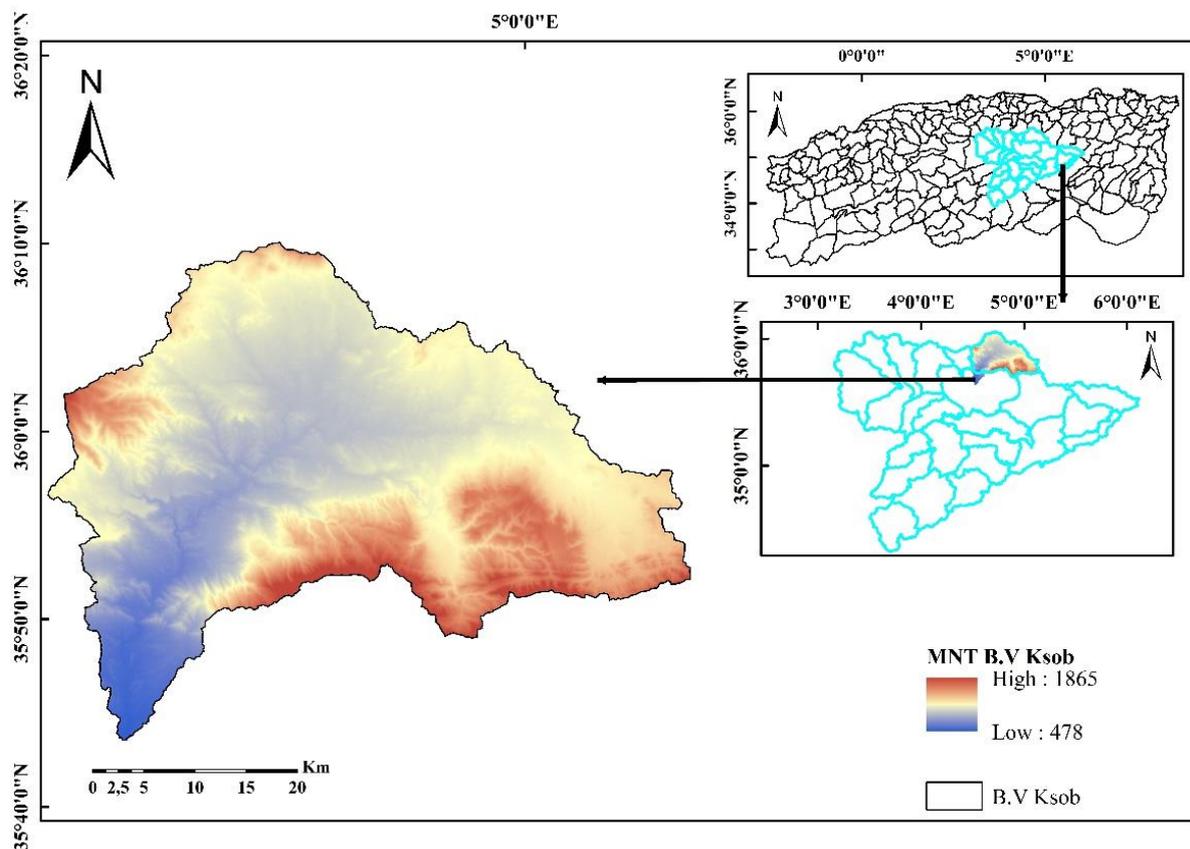


Fig.19. Localisation et situation géographique de bassin versant du K'sob.

Le bassin versant du K'sob contient deux unités physiques particulières, aux limites montagneuses, entre lesquelles s'étend une vaste plaine appelée la « Haute Plaine de Bordj-Bou-Arredj ».

Les bordures sont formées au Sud par les monts de Hodna en direction E-W (Dj Maâdid 1819 m, Dj el Mzaita 1545 m et Dj Kender 1640 m). Le point culminant est d'environ 1875 m à Dj chelendj ; cette bordure est divisée en deux : par l'Oued K'sob, le Nord est divisé en deux : par la chaîne de la Bibane (Dj Moutène) en direction du SW-NE. L'altitude moyenne de la plaine est proche de 950m et la pente est très faible ; pas plus de 1% (Sara, 2016).

3.2. Caractéristiques géomorphologiques du bassin versant du K'sob (Tab. 5)

3.2.1. Caractéristiques de forme

a. Superficie du bassin versant :

La superficie du bassin versant est l'un des paramètres les plus importants qui s'expriment en Km². Elle s'obtient par planimétrie sur une carte topographique après que l'on y ait tracé les limites topographiques ou par les techniques de digitalisation (BOURAHLA, 2016).

Dans notre cas, la surface du bassin versant de l'oued K'sob a été calculée par l'ArcGIS 10.4. Elle est de l'ordre : **A=1570 Km²**.

b. Périmètre du bassin versant :

Il correspond à la longueur de la limite extérieure du bassin et peut-être mesurée à l'aide d'un curvimètre ou numérisée à l'aide des logiciels comme l'ArcGIS. L'intérêt fondamental du périmètre est de pouvoir calculer l'indice de compacité et la longueur du rectangle équivalent (BOURAHLA, 2016). Le périmètre du B.V du K'sob est : **P=241.7 Km**.

c. Indice de compacité de Gravelius (Kc) :

L'indice de compacité informe sur la forme du bassin versant qui a un effet sur le débit de crue (Faye, 2018). Cet indice est défini :

$$Kc = \frac{P}{2 * \sqrt{\pi * A}} \cong 0.28 * \frac{P}{\sqrt{A}}$$

$$Kc = 0.28 * \frac{241.7}{\sqrt{1570}} = 1.71$$

Avec :

P : périmètre du bassin versant [km] ;

A : aire du bassin versant (km²) ;

Kc : indice de compacité de Gravelius.

Si :

$0 < Kc < 1$: bassin parfaitement circulaire ;

$1 < Kc < 1.128$: bassin carré ;

$1.128 < Kc < 3$: bassin allongé.

Le coefficient de Gravelius pour le bassin versant du K'sob est de : **Kc = 1.71**, donc la forme est allongée.

d. Longueur du thalweg principal :

C'est la longueur du plus long thalweg du bassin versant de l'amont vers l'aval qui est indiquée sur les cartes topographiques. Cette longueur est définie :

$$Lp = \frac{Kc\sqrt{A}}{1.128} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.128}{Kc}\right)^2} \right]$$

$$Lp = \frac{1.71\sqrt{1570}}{1.128} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.128}{1.71}\right)^2} \right] = 105.21 \text{ Km}$$

Avec :

Lp : longueur du thalweg principal [km] ;

Kc : indice de compacité de Gravelius ;

A : surface du bassin versant [Km²] ;

Donc **Lp** du bassin versant du K'sob est de : **105.21 Km**.

e. Rectangle équivalent :

Nommé aussi « rectangle de Gravelius ». Il correspond à une transformation purement géométrique du bassin versant. Il prend alors une forme rectangulaire tout en conservant la même superficie, le même périmètre, le même indice de compacité et donc logiquement, il garde la même répartition hypsométrique (Faye, 2018).

Les dimensions Longueur "L" et largeur "I" du rectangle équivalent sont déterminées par (Roche, 1963) :

$$L = \frac{Kc\sqrt{A}}{1.12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{Kc}\right)^2} \right]$$

$$L = \frac{1.71\sqrt{1570}}{1.12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{1.71}\right)^2} \right] = 106.21 \text{ Km}$$

$$l = \frac{Kc\sqrt{A}}{1.12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{Kc}\right)^2} \right]$$

$$l = \frac{1.71\sqrt{1570}}{1.12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{1.71}\right)^2} \right] = 14.78 \text{ Km}$$

Avec :

L : longueur du rectangle équivalent [km] ;

l : largeur du rectangle équivalent [km].

On obtient les valeurs suivantes : **L**=106.21 km, **l**=14.78 km.

f. Temps de concentration :

Le temps de concentration est défini comme le temps qu'il faut à une goutte d'eau pour tomber des hauteurs d'un bassin versant jusqu'à l'exutoire (Touaibia, 2004). Ce paramètre s'exprime sous de nombreuses formes, y compris la formule de CALIFORNIA :

$$T_c = \left(\frac{0.87 * Lp^3}{H_{max} - H_{min}} \right)^{0.386} = \left(\frac{0.87 * 105.21^3}{1865 - 478} \right)^{0.386} = 12.75 \text{ Heure}$$

3.2.2. Paramètres du relief

3.2.2.1. La courbe hypsométrique

La courbe hypsométrique donne une vision synthétique de la pente du bassin versant et représenté par la répartition de la surface du bassin versant en fonction de son altitude. Cette courbe montre, en abscisse, le pourcentage de la surface du bassin (surface accumulée) au-dessus de la hauteur de l'ordonnée, reflétant également son état d'équilibre dynamique potentiel (*Abdellah El Hmaidi, 2016*) (Tab. 2).

Tab.2. Répartition hypsométrique du bassin versant du K'sob.

Altitude (m)	Hi (m)	Superficie Ai (km²)	Superficie cumulée (km²)	Superficie A (%)	Superficie cumulée (%)	Ai × Hi (km².m)
478-500	489	3.26	3.26	0,21	100	1594.14
500-600	500	51.37	54.63	3,27	99,8	25685
600-700	650	51.36	105.99	3,27	96,6	33384
700-800	750	97	202.99	6,18	93,3	72750
800-900	850	231.3	434.29	14,74	87,1	196605
900-1000	950	336.94	771.23	21,47	72,4	320093
1000-1100	1050	297.01	1086.24	18,93	50,9	311860.5
1100-1200	1150	160.04	1228.28	10,2	32	184046
1200-1300	1250	95.24	1323.52	6,07	21,8	119050
1300-1400	1350	93.24	1416.77	5,94	15,7	125874
1400-1500	1450	90.13	1506.9	5,74	9,7	130688.5
1500-1600	1550	35.81	1542.71	2,28	4	55505.5
1600-1700	1650	18.57	1561.28	1,18	1,7	30640.5
1700-1865	1782.5	8.39	1569.67	0,53	0,5	14955.175
Total	15421.5	1569.66		100		1622731.315

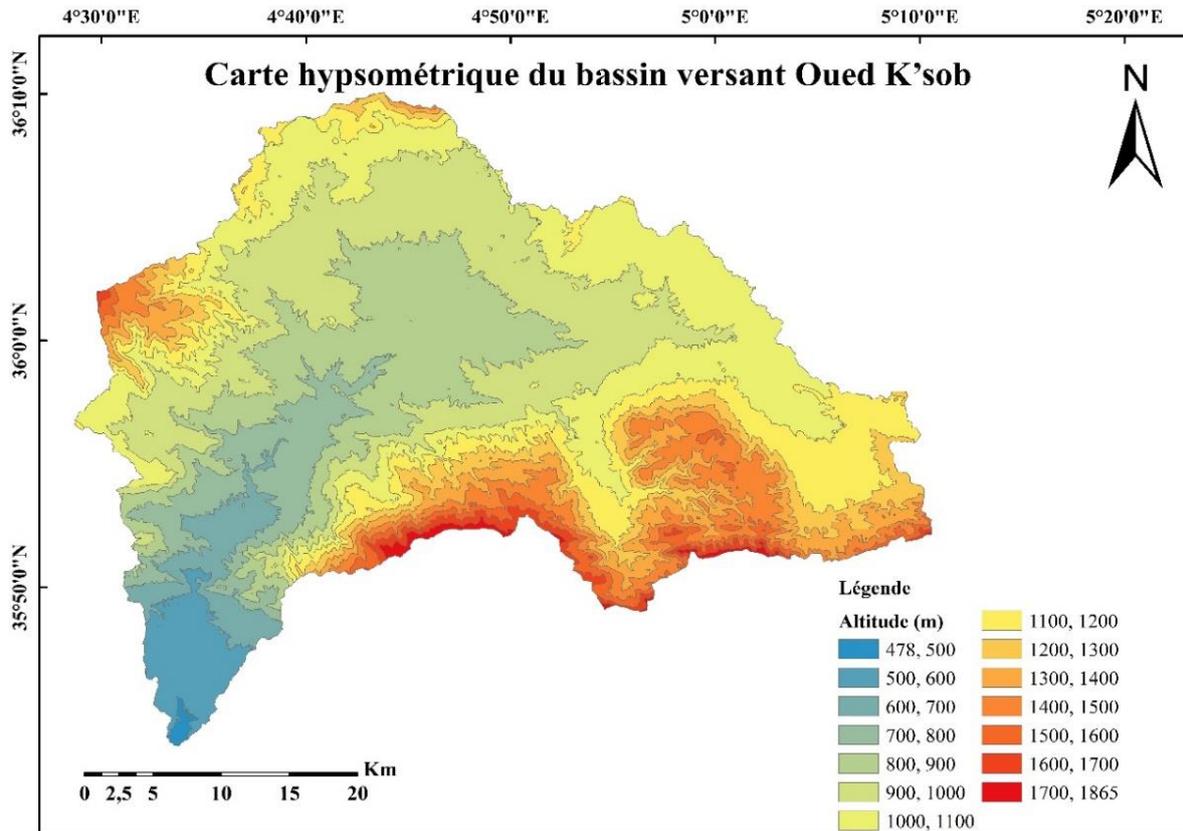


Fig.20. Carte hypsométrique du bassin versant de l'Oued K'sob.

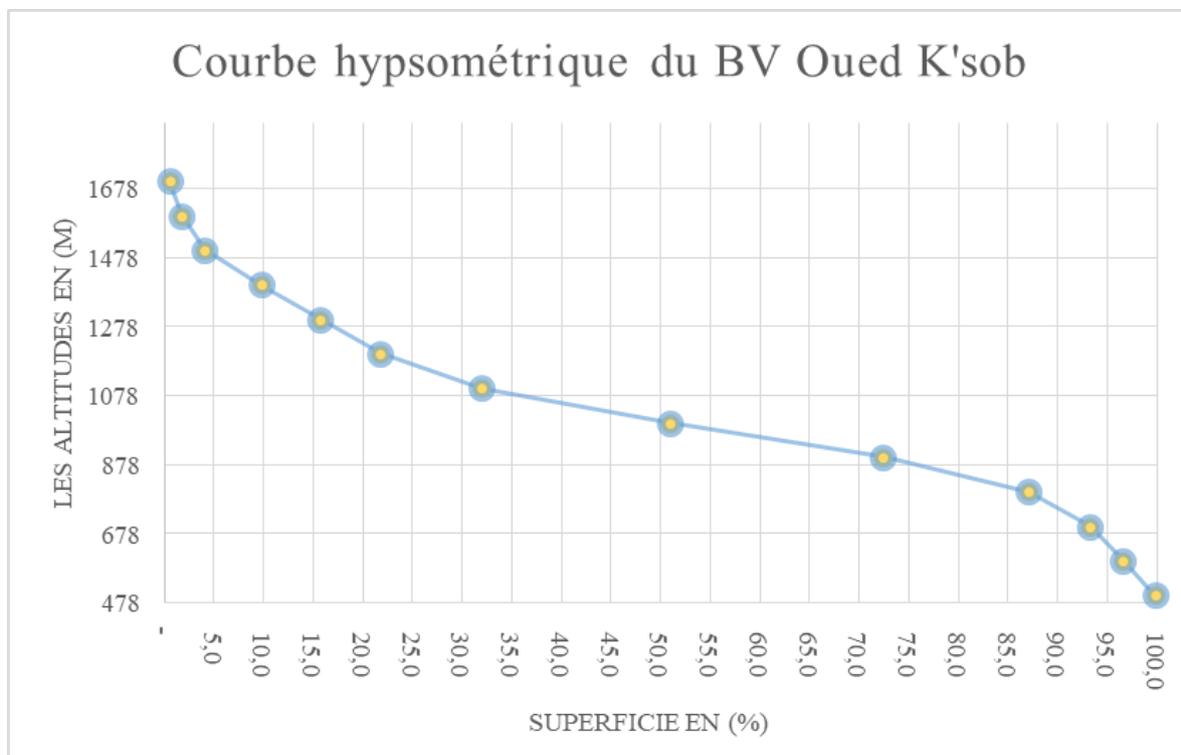


Fig.21. Courbe hypsométrique du bassin versant du K'sob.

La courbe (Fig. 21) et la carte hypsométrique du bassin versant de l'Oued K'sob (Fig. 20) montrent que 65,34 % de la surface totale est située entre 800 et 1200 m, ce qui signifie que le bassin versant du K'sob est situé dans les hauts plateaux. On constate que la proportion des surfaces en dessous de 800 m est très faible, soit environ 12,93 %.

La zone au-dessus de 1200 m d'altitude représente environ 21,74 % de la superficie, qui correspond aux bordures montagneuses des Monts de Hodna au Sud et du Djebel Moutene au Nord. De la courbe hypsométrique, on peut également conclure que la pente est relativement forte, ce qui augmentera la vitesse d'écoulement et provoquera une érosion potentiellement très importante au niveau du bassin versant.

3.2.2.2. Les altitudes caractéristiques

a. Les altitudes maximale et minimale :

Elles sont obtenues directement à partir de la carte topographique. L'élévation la plus haute représente le point le plus haut du bassin, tandis que l'élévation la plus basse considère le point le plus bas, généralement à l'exutoire (GUERSAS, 2016).

On a : $Z_{\max} = 1865 \text{ m}$; $Z_{\min} = 478 \text{ m}$.

b. L'altitude moyenne :

L'altitude moyenne est dérivée directement de la courbe hypsométrique ou des lectures de la carte topographique (GUERSAS, 2016) (Tab. 3). Elle peut être définie comme suit :

$$H_{\text{moy}} = \sum \frac{A_i * H_i}{A_{BV}}$$

Avec :

H_{moy} : altitude moyenne du bassin (m) ;

A_i : aire comprise entre deux courbes de niveau (km^2) ;

H_i : altitude moyenne entre deux courbes de niveau (m) ;

A_{BV} : superficie totale du bassin versant (km^2), $A = 1569.66 \text{ km}^2$.

On prend $H_{\text{moy}} = 1033.81 \text{ m}$.

Tab.3. Détermination de l'altitude moyenne du bassin versant de l'Oued K'sob.

Altitude (m)	Hi (m)	Superficie Ai (km²)	Ai × Hi (km².m)	Ai*Hi/A
478-500	489	3.26	1594.14	1.02
500-600	500	51.37	25685	16.36
600-700	650	51.36	33384	21.27
700-800	750	97	72750	46.35
800-900	850	231.3	196605	125.25
900-1000	950	336.94	320093	203.93
1000-1100	1050	297.01	311860.5	198.68
1100-1200	1150	160.04	184046	117.25
1200-1300	1250	95.24	119050	75.85
1300-1400	1350	93.24	125874	80.19
1400-1500	1450	90.13	130688.5	83.26
1500-1600	1550	35.81	55505.5	35.36
1600-1700	1650	18.57	30640.5	19.52
1700-1865	1782.5	8.39	14955.175	9.53
Total	15421.5	1569.66	1622731.315	1033.81

c. L'altitude médiane :

L'altitude médiane correspond à l'altitude lue sur la courbe hypsométrique, à 50% de l'abscisse de la surface totale du bassin versant. Dans le cas où la courbe hypsométrique du bassin versant considéré présente une pente régulière, cette grandeur est proche de l'altitude moyenne (GUERSAS, 2016). Selon la courbe hypsométrique (Fig. 21), nous avons :

- Altitude à 95% de la surface, **H95% = 638 m.**
- Altitude à 5% de la surface, **H5% = 1478 m.**
- Altitude médiane 50%, **H50% = 998 m.**

d. L'indice de pente :

Le but de ces indices est de caractériser les pentes d'un bassin versant et de comparer les bassins versants entre eux (GUERSAS, 2016). Dans notre étude, la carte des pentes est générée par le modèle numérique de terrain avec une précision de 30 m, les gradients minimum et maximum dans la zone d'étude sont de 0° à 50,78°, respectivement. La carte des pentes (Fig. 22) montre une forte proportion de terrains dont la pente est de 0° à 20°, témoignant de la nature peu montagneuse du bassin.

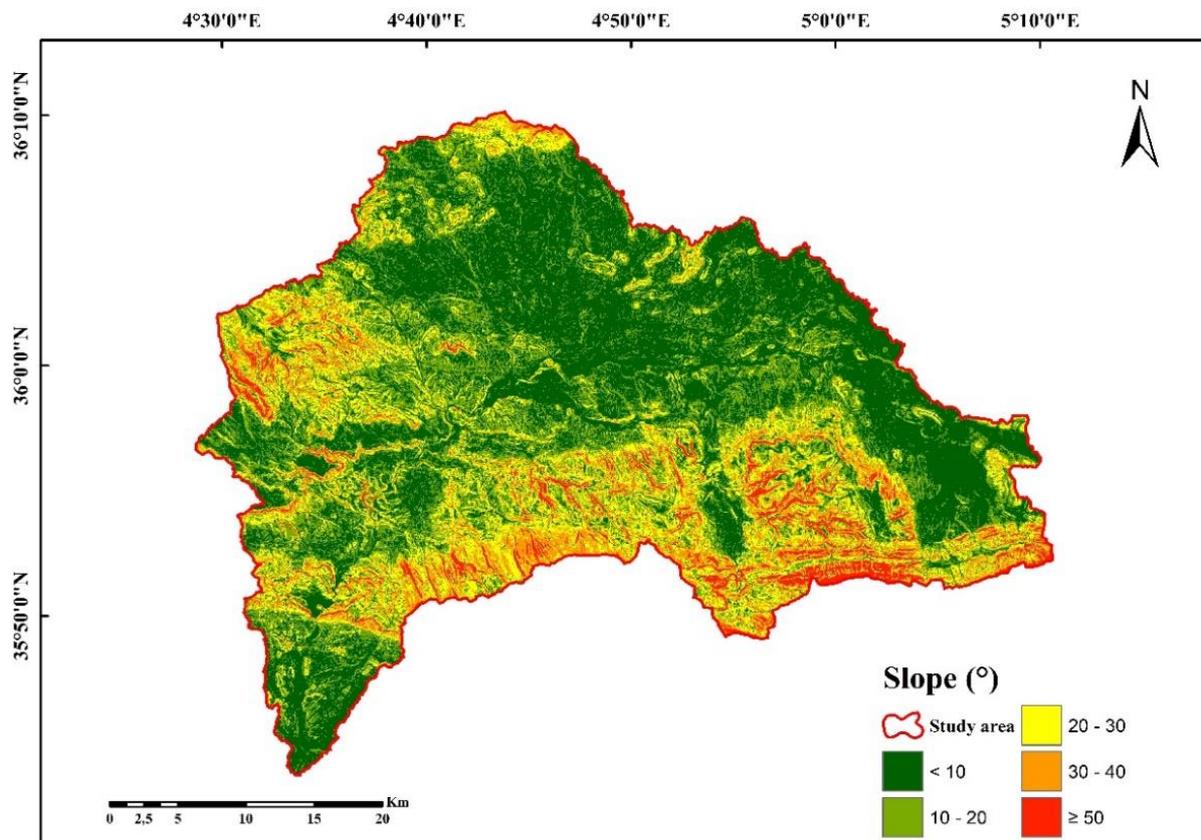


Fig.22. Carte des pentes du bassin versant de l'Oued K'sob.

e. L'indice de pente globale (Ig) :

C'est un indice qui tient compte de la dénivelée (D) et de la longueur du rectangle équivalent (BOURAHLA, 2016).

$$Ig = \frac{D}{L}$$

$$Ig = \frac{H5\% - H95\%}{L} = \frac{1478 - 638}{106.21}$$

$$Ig = 7.91m/km$$

Avec :

I_g : indice de pente globale (m/Km) ;

D : dénivelée simple (m) ;

L : longueur du rectangle équivalent (km).

f. La dénivelée spécifique :

Elle détermine l'état topographique du bassin versant et calculée à l'aide de la formule suivante :

$$D_s = I_g \sqrt{A} = 313.39 \text{ m}$$

Elle produit un deuxième classement d'O.R.S.T.O.M (Tab. 4), indépendant de la surface du bassin. Par conséquent, la différence de dénivelée spécifique semble être une correction de la dénivelée simple en appliquant un coefficient qui dépend de la forme du bassin, ce qui offre la possibilité de comparer les valeurs entre différents bassins versants (BOURAHILA, 2016).

Tab.4. Classification de dénivelée spécifique d'après l'O.R.S.T.O.M

$D_s < 10 \text{ m}$	Relief très faible
$10\text{m} < D_s < 25\text{m}$	Relief faible
$25\text{m} < D_s < 50\text{m}$	Relief assez faible
$50\text{m} < D_s < 100\text{m}$	Relief modéré
$100\text{m} < D_s < 250\text{m}$	Relief assez fort
$250\text{m} < D_s < 500\text{m}$	Relief fort
$D_s > 500\text{m}$	Relief très fort

D'après la classification de l'O.R.S.T.O.M, notre bassin versant présente un **relief fort** ($250 \text{ m} < D_s < 500 \text{ m}$).

3.2.3. Paramètres du réseau hydrographique

Un réseau hydrographique est un ensemble de canaux qui évacuent les eaux de surface à l'exutoire d'un bassin versant. La définition d'un cours d'eau est difficile à donner avec précision, surtout un cours d'eau temporaire.

Le réseau du bassin versant de l'Oued K'sob est constitué de deux affluents dont la source se situe sur le versant Nord des monts du Hodna :

- Oued Bieta, dont la source se situe entre 1200m et 1400m au Nord de l'anticlinal des oueds Tebben ;
- Oued-El-Amri qui est formé à 1700m d'altitude sur le versant Nord du Djebel Sidi Sahab (Bordj-Gh'dir Wilaya de Bordj-Bou-Arredj).

Ces deux affluents rassemblent toutes les eaux qui traversent la partie orientale du bassin. Après avoir convergé, Oued K'sob coule vers le Sud-Ouest et contourne Dj Maâdid. Il reçoit plusieurs affluents, dont l'Oued Lechbour des monts Médjana et l'Oued Ziatine descendant des contreforts du Dj Mansourah au Sud-Ouest du bassin (Sara, 2016).

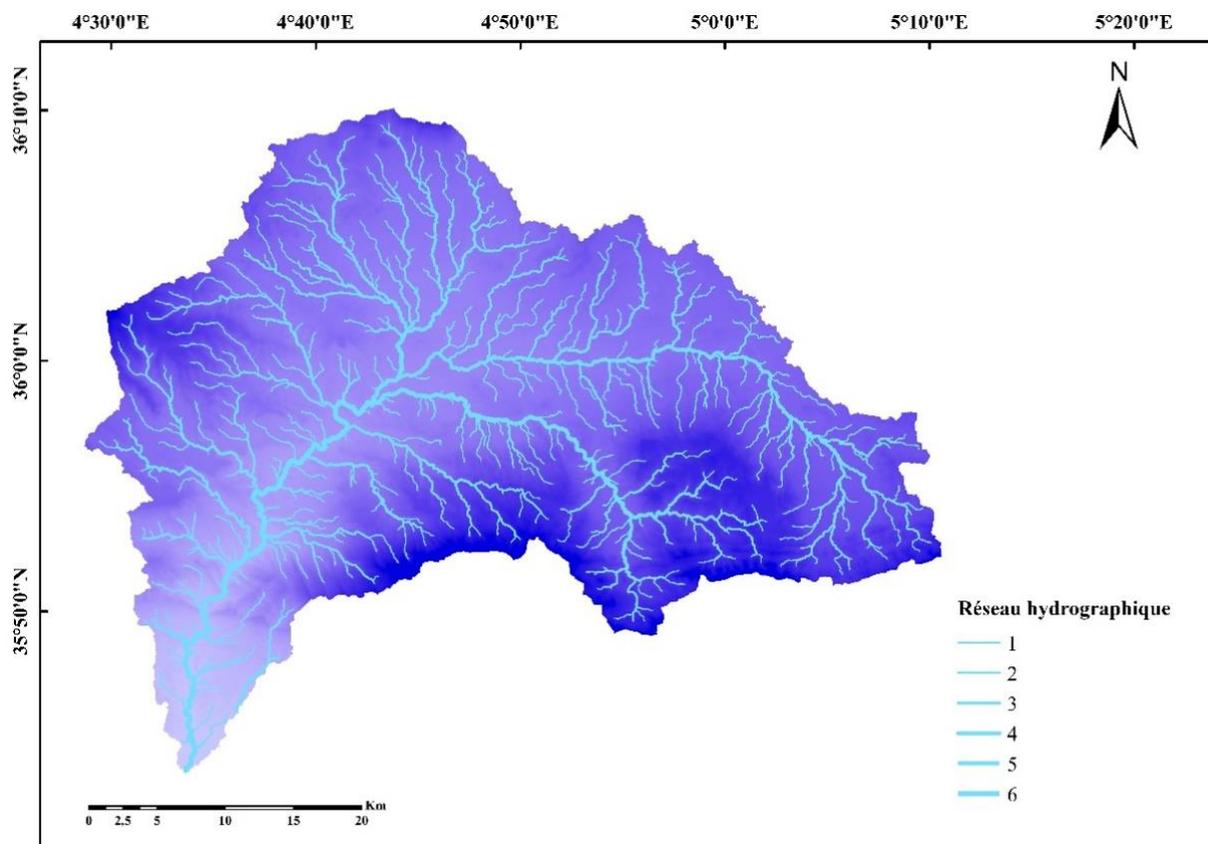


Fig.23. Carte du réseau hydrographique du bassin versant l'Oued K'sob.

a. Hiérarchisation du réseau hydrographique :

Pour quantifier la ramification du réseau, chaque cours d'eau a reçu un numéro en fonction de son importance. Cette numérotation est appelée ordre du cours d'eau. Parmi plusieurs classifications, nous utiliserons la classification de Strahler :

- Tout cours d'eau qui n'a pas d'affluents est considéré d'ordre 1.
- Lorsque deux flux de même ordre n se rencontrent, l'ordre du flux résultant est $n + 1$.

- Un cours d'eau recevant un affluent d'ordre inférieur maintient son ordre, c'est-à-dire traverser : $n + n = n + 1$ et $n + m =$ valeur maximale ($n.m$) (Sara, 2016).

À l'aide du logiciel ArcGIS, nous avons trouvé que le bassin versant de l'Oued K'sob est d'ordre **6** (Fig. 23).

b. Densité de drainage :

La densité de drainage est la longueur totale du réseau hydrographique par unité de surface du bassin versant. Elle se définit pour un bassin versant donné, de superficie A, comme étant le rapport de la longueur totale des cours d'eau d'ordre quelconque sur la superficie totale A du bassin versant. La densité de drainage est exprimée en km/km^2 ou en km^{-1} (Sara, 2016).

$$Dd = \frac{\sum Li}{A} = \frac{1363}{1570} = 8.68 \text{ Km}^{-1}.$$

Avec :

Li : longueur totale des cours d'eau (km) ;

A : superficie du bassin-versant (km^2) ;

$\sum Li = 1363 \text{ Km}$; et leur $A = 1570 \text{ Km}^2$.

Donc, **Dd = 8.68 Km^{-1} .**

c. Densité hydrographique :

La densité hydrographique représente le nombre de thalwegs d'écoulement par unité de surface (Sara, 2016).

$$F = \frac{\sum Ni}{A} = \frac{\sum 958}{1570} = 0.61$$

Avec : F : densité hydrographique (Km^{-2}) ;

Ni : nombre de cours d'eau ;

A : superficie du bassin (Km^2) ;

$\sum Ni = 958$; et $A = 1570 \text{ km}^2$.

Donc, **F = 0.61 Km^{-2} .**

Tab.5. Récapitulatif des principales caractéristiques morphométriques du bassin versant du K'sob.

Caractéristiques morphométriques	Symbole	Résultat	Unité	Observation
Surface	<i>A</i>	1570	<i>Km²</i>	/
Périmètre	<i>P</i>	241.7	<i>Km</i>	/
Indice de compacité de Gravelius	<i>Kc</i>	1.71	/	Forme allongée
Longueur du thalweg principal	<i>Lp</i>	105.21	<i>Km</i>	/
Longueur du rectangle équivalent	<i>L</i>	106.21	<i>Km</i>	/
Largeur du rectangle équivalent	<i>l</i>	14.78	<i>Km</i>	/
Temps de concentration	<i>Tc</i>	12.75	<i>Heure</i>	/
Maximale	<i>Z max</i>	1865	<i>m</i>	/
Minimale	<i>Z min</i>	478	<i>m</i>	/
Moyenne	<i>H moy</i>	1033.81	<i>m</i>	/
Médiane 50%	<i>H50%</i>	998	<i>m</i>	/
Altitude à 95%	<i>H95%</i>	638	<i>m</i>	/
Altitude à 5%	<i>H5%</i>	1478	<i>m</i>	/
Indice de pente globale	<i>Ig</i>	7.91	<i>m/Km</i>	/
Dénivelée spécifique	<i>Ds</i>	313.39	<i>m</i>	Relief fort
Ordre de réseau hydrographique	/	6	/	/
Longueur totale des cours d'eau	$\sum Li$	1363	<i>km</i>	/
Densité de drainage	<i>Dd</i>	8.68	<i>Km⁻¹</i>	/
Densité hydrographique	<i>F</i>	0.61	<i>Km⁻²</i>	/

3.3. Cadre géologique

3.3.1. La Géologie du bassin versant de l'Oued K'sob

Le bassin versant et ses affluents comprennent la grande dépression de Médjana au Nord-Ouest de Bordj-Bou-Argeridj et la bordure du massif de Maâdid (cuvettes de Bordj Gh'dir et de Ras El Oued) qui sont principalement charriées au Quaternaire et formations à beaucoup écaillée, par exemple calcaire, grès, schiste, marne, marno-calcaire et dolomite. Le bassin versant de l'Oued K'sob est principalement situé au Tell.

Les formations lithologiques du bassin versant de l'Oued K'sob sont variées, mais sont principalement des formations calcaires. La série calcaire pure de l'Aptien inférieur forme un ensemble homogène s'étendant vers le Sud jusqu'aux monts du Hodna et du Djebel M'zita ; cependant, il existe quelques affleurements au Nord et au Nord-Est. Des formations alternées de calcaire et de marne se présentent en plusieurs unités de tailles variables. Cependant, elles ont trouvé leur plus grande extension au Nord, le plateau de M'zita et les montagnes de Maâdid. Les affleurements de calcaire marneux sont répandus dans la partie Sud du bassin, en particulier dans le Djebel Maâdid, le plateau de Lestah à l'Ouest et Mzaita à l'Est.

Les formations gréseuses représentent 1/3 du bassin versant, et la série gréseuse exclusive est petite et limitée à l'affleurement Sud du Djebel Morissane (Bordj-Bou-Argeridj). La série alternée de grès et d'argile, de grès et de marne s'étend sur une grande surface, la première fois occupant la partie Nord-Est du bassin de manière continue, et la seconde fois elle est exposée en plusieurs endroits discontinus, notamment au Sud-Ouest.

Il est à noter que toute la partie sud du bassin de K'sob (50% de la superficie) a été affectée par la fracturation ou la karstification. La partie nord du bassin est principalement composée de calcaire, de grès et d'alluvions quaternaires (BOURAHLA, 2016; Sara, 2016).

3.3.2. La litho-stratigraphie

Sa lithologie est constituée de formations suivantes d'après les ("*Notices explicatives des cartes géologiques 1/50000 (Bourj Bou Argeridj, Ain Taghrout, Maâdid, Ras El Oued).*") (Fig. 24) :

a. Quaternaire : Il est représenté en général par des alluvions récentes, des éboulis, des alluvions anciennes, des alluvions des plateaux et Travertin recouvrent les cuvettes de Ras-El-Oued et de Bordj-Gh'dir, et rencontrent aussi dans la dépression de Médjana. Ces terrains s'étendent sur de grandes surfaces et occupent ainsi 35% du bassin versant.

a.1. Alluvions récentes : Elles représentent des limons argileux autour de Bordj-Bou-Arreidj, des cailloutis de sables calcaires sur les bords de l'Oued K'sob et de l'Oued Amri.

Des éboulis des pentes sur les terrains accidentés comme Djebel Maâdid, Djebel Zdimm et Djebel Mansourah, des cailloux et des gros blocs au pied Sud du Djebel El-Debbous bien cimentés, profondément entaillés par l'Oued Tiouira.

a.2. Alluvions anciennes : sont des dépôts limino-graveleux, sable et cailloutis le long de la plupart des vallées dans le pays plat, notamment dans les plaines au Sud d'Ain-Tagrout, au Sud de Tixter et Sud du Djebel Zdimm. De terrasse alluviale (limons, graviers, cailloux) à bord inférieur n'a été figurée qu'au Sud de Bordj-Bou-Arreidj, le lit de l'Oued Gh'dir, de l'Oued Ras-El-Oued et de l'Oued El Hammam.

a.3. Alluvions des plateaux : Alluvions anciennes caillouteuses d'épaisseur très variable, recouvrent des grandes surfaces dans les plateaux de Bordj-Bou-Arreidj, les bassins de Ras-El-Oued et de Bordj Gh'dir.

a.4. Travertin : Dépôts de sources, formés par l'encroutement de débris végétaux, d'âge plus ou moins récent, se retrouvent dans les bassins de Ras-El-Oued.

b. Pliocène : est une formation bien limitée près de l'Oued K'sob et dans l'extrême Sud, surtout de Medjez jusqu'à Kebour Missa, et composée de sables et de conglomérats à ciment calcique. Et se trouve aussi au Nord de Chenia (Bordj-Bou-Arreidj), table de calcaires durs de couleur blanchâtre, rosé à Ain-Tagrout et à Mezloug.

c. Miocène : Il occupe une grande surface dans le bassin versant de l'Oued K'sob. De larges bandes dans le Nord et le Sud et quelques points isolés, près de Gourine, cet étage est nettement transgressif sur le Crétacé (du Maëstrichtien au Cénomanién). Dans le Sud, la discordance angulaire sur l'Oligocène n'est que de quelques degrés, dans le SW seulement, il masque graduellement les couches de l'Oligocène et du Lutétien supérieur. La base de Miocène (Burdigalien) est représentée sur tout le bassin par des micro-brèches et des conglomérats. Au Nord on observe une alternance d'argiles marneuses et des grés calcique dans les dépressions de Bordj-Bou-Arreidj. Dans le Sud, les argiles de M'Krazéne montrent bien plus

d'intercalations de lits gréseux, tandis qu'à l'Est la série des argiles et des grés devient plus argileuse vers la limite de Ras-El-Oued.

d. Oligocène : Il est représenté par des argiles marneuses et des sables fins. Des grés calciques gris ou rougeâtres, rares intercalations d'argiles verdâtres, n'est visible qu'à l'Ouest du K'sob, et des marnes grises, il s'agit d'un seul affleurement au Djebel Bou-Temra.

e. Eocène : Il comprend à la fois Lutétien supérieur et Lutétien inférieur et Yprésien. C'est une série puissante d'environ 200 m.

e.1. Lutétien Supérieur : Il dessine une bande continue jusqu'au versant sud de Maâdid au SW. Alternance d'argiles marneuses vertes et des lits irréguliers de gypse. En plusieurs points, intercalations plus sableuses et rouges. Couches lagunaires des argiles gris-vert, plus ou moins gypsifère, atteignant au cœur du synclinal de Rouss El Meuhr. Marnes brunes et lentilles calcaires jaunes entre Ain Tagrout et Paul- Doumer (Bordj-Gh'dir).

e.2. Lutétien inférieur : représenté par une série de marnes et de calcaires dolomitiques et dolomies dans l'Est du plateau du Djebel M'zaita et dans le bassin de Bordj Gh'dir. Une série composée de calcaires gris et des marnes grises dans le bassin de Ras-El-Oued, et dans l'unité de Paul- Doumer (Bordj-Gh'dir) des calcaires à globigérines.

e.3. Yprésien : comprends des calcaires durs noirâtres, et des calcaires à silex formant les points culminants des hautes collines du Kramsa jusqu'à El-Kraker.

Yprésien-Thanétiens, cet ensemble se compose de calcaires parfois marneux ou dolomitiques dans le bassin de Ras-El-Oued.

f. Paléocène : Marnes noirâtres un peu gypsifères, sous des bancs de calcaires à silex phosphatés, ont une épaisseur de 40-75 cm dans le SW et plus d'un mètre sur le bord Sud du Djebel Maadid.

f.1. Dano- Montien : Il se trouve dans l'Allochtone d'Ouled Sidi-Amor et l'Allochtone Paul- Doumer (Bordj-Gh'dir) et le Sud du Djebel Maâdid, composé de marnes indurées et calcaires marneux gris à la base un banc de calcaire.

g. Crétacé : Subdivisé en Crétacé supérieur et crétacé inférieur. Ces terrains occupent approximativement 25% du bassin versant particulièrement au sud du bassin dans les monts du Hodna.

g.1. Crétacé supérieur :

g.1.1. Maëstrichtien : affleurant en longue bande dans le Sud du Kebour-Rahmane jusqu'au Djebel Zarouga, puis largement sur le flanc Nord du Maâdid, jusque près d'El Euch à l'Ouest, est composé de bancs de calcaires zoogènes et de lumachelles.

g.1.2. Sénonien : calcaires et lumachelles à huitres au N-E de Cérez, et sériés à l'affleurement au flanc Nord de Koudiat-Della, et marnes noires ordinairement schisteuses à Bordj-Bou-Arreridj.

g.1.3. Turonien : formant plusieurs escarpements sur les crêtes et le flanc occidental du Maâdid, il affleure en quelques points isolés dans le centre (gorge du K'sob) et le N-W (Kef El Assel, Bir Mizane), et des dolomies cristallines claires.

g.1.4. Cénomanién : est constitué de marnes avec des calcaires, en minces bancs bien lités dans la partie Ouest du Djebel Maâdid. Cette série est très fossilifère, le Cénomanién occupe de larges dépressions topographiques, et se trouve aussi à M'sila.

g.2. Crétacé inférieur :

g.2.1. Emschérien : comprenant des assises appartenant au coniacien et probablement au Santonien inférieur, couvre de grandes surfaces. L'ensemble se termine dans toute la région par un ou quelques bancs de calcaires et au sommet un horizon marno-calcaire mince, dominant dans la partie supérieure sur le flanc Nord du Maâdid.

g.2.2. Albien : affleure seulement dans Djebel Maâdid. Le sommet est formé de quelques mètres de marnes noires et d'un banc de calcaire, au-dessous vient une série de calcaires zoogènes, souvent marneux, alternant avec des marno-calcaires noduleux et des marnes dures, contenant parfois de grandes huitres de faciès avec les monts du Hodna.

g.2.3. Aptien supérieur : le sommet, n'apparaissant que dans le Djebel Maâdid contient des calcaires durs, se divisant en bancs surtout vers le haut, ces bancs sont souvent Oolithiques. La partie inférieure se compose principalement de marnes grises, de marnes sableuses verdâtres et jaunâtres, de dolomies, de calcaires et d'argiles. Dans la partie Ouest du Djebel Maâdid (Fef Laeli) les calcaires de la base sont pétris, de Marnes et calcaires à Orbitolines du flanc Nord du Djebel Zdim.

g.2.4. Aptien inférieur- Barrémien : Entité lithologique bien distincte, dolomies compactes et massives, calcaires le plus souvent dolomitiques du versant Sud du Djebel Zdimm, marnes et argiles gréseuses, et grès quartziteux. Cette puissante série joue un rôle important dans le relief de la chaîne du Hodna.

g.2.5. Hauterivien : Etage présente deux faciès bien différents. Dans le Sud du Douar Taglait et dans le S-W des Ouled Tebben. Il existe un faciès gréseux et des grès quartziteux. Le changement de faciès s'aperçoit nettement au pied Est du Djebel Safiat-El-Kerba à la base de l'étage quelques niveaux calcaires. Plus au Nord et plus à l'Est le faciès devient entièrement calco-marneux.

h. Trias : sont des argiles bariolées cargneules, brèches calcaires et dolomitiques, masses de gypse. Complexe gypso- salifère et argileux, avec débris de dolomie noire probablement liasique. Existe à la base de Paul- Doumer (Bordj Gh'dir) et des Ouled-Sidi-Amor, et affleurant dans les écaïlles du Djebel Sattor.

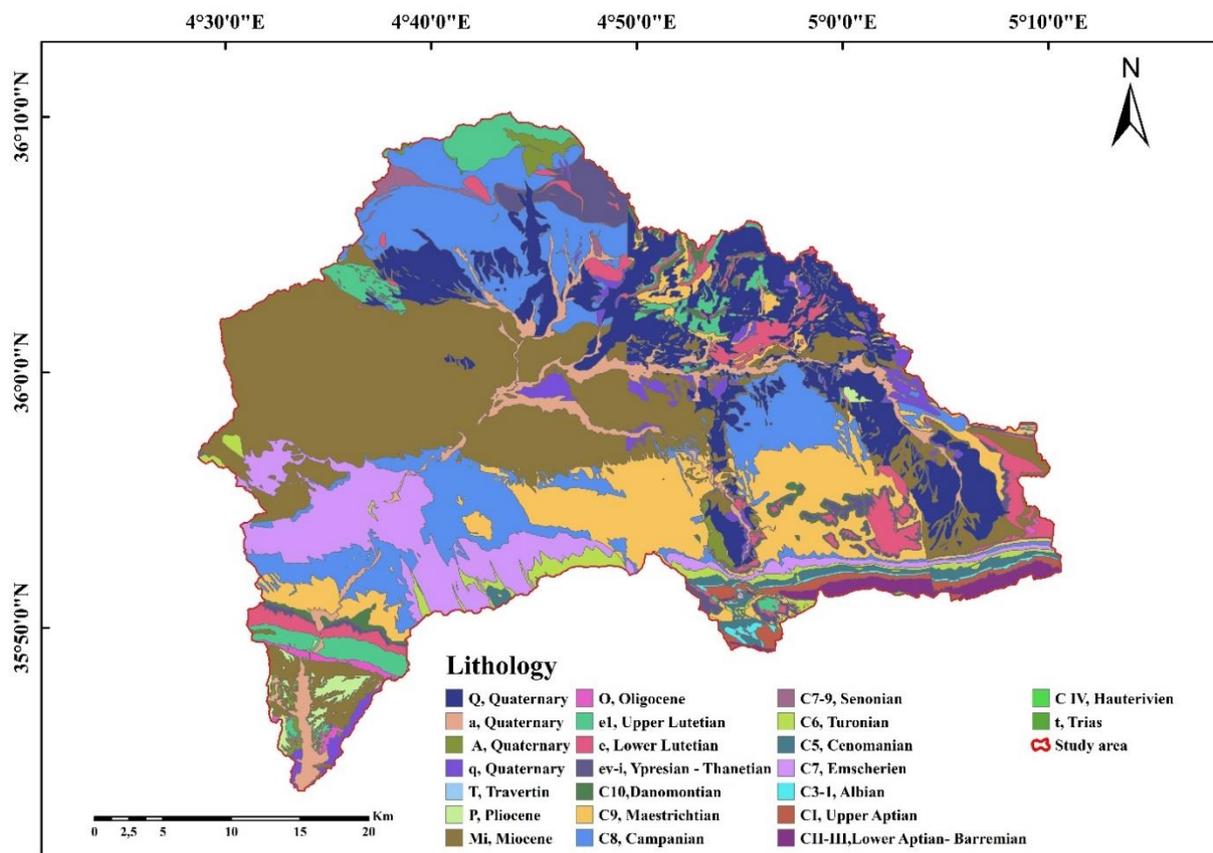


Fig.24. La lithologie du bassin versant de l'Oued K'sob.

3.3.3. Structure tectonique :

a. Les failles :

En particulier, les failles sont dans la direction Nord-Ouest et Sud-Est, et les principaux accidents structuraux sont dans la direction Est-Ouest. En particulier, la masse continentale du Crétacé était coupée par un certain nombre de failles caractérisées par des failles normales, qui auraient pu se former en deux étapes successives (BOURAHLA, 2016) :

- La première est pré-Miocène et appartient aux failles Est-Ouest observées dans les Monts de Maâdid. De nombreuses failles orientées Nord-Ouest et Sud-Est remontent à des stades antérieurs.
- A un moment donné (près de Medjez), ces failles étaient récents, étrangement très proches, d'autres se sont succédé dans une direction plutôt Est-Ouest (Fig.25).

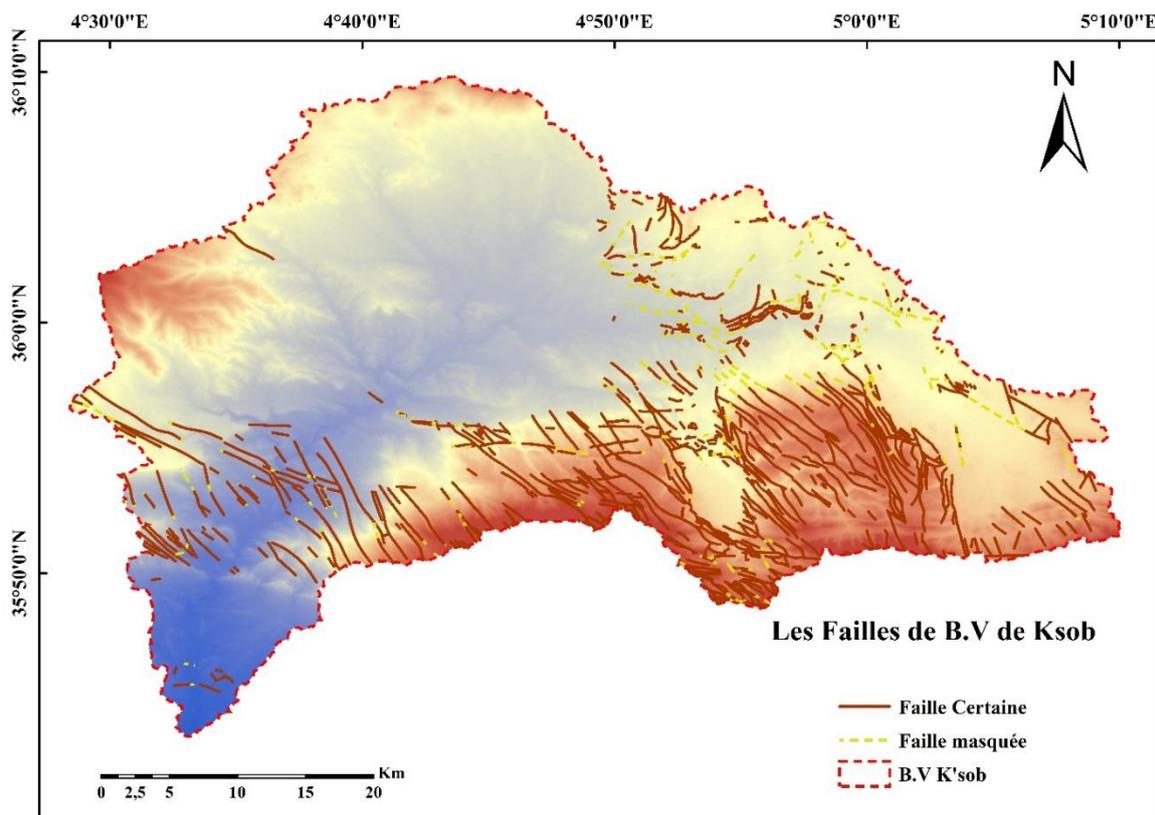


Fig.25. Carte des failles du bassin versant du K'sob.

b. Les plis :

D'une manière générale, il existe deux unités structurelles importantes :

- La première comprend les anticlinaux de Maâdid et Medjez-Dréât (Wilaya de M'sila). Elle fait partie d'une rangée d'anticlinaux au Nord de Chott-El-Hodna.
- La seconde est formée dans la partie Nord, principalement au Nord-Ouest du plateau miocène, formant un léger coude au-dessus de l'anticlinal du Déât.

Au Sud du Djebel Maâdid, les couches du Crétacé et du Paléogène apparaissent dans un large anticlinal asymétrique. L'inclinaison de l'aile Sud varie de verticale à légère, et ils sont plus faibles dans le revers Nord. L'anticlinal se termine à l'Est de l'Oued K'sob. A l'Ouest, il est remplacé par l'anticlinal de Dréât, légèrement bombé, débutant près de Medjez. Le niveau le plus bas appartient au Cénomaniens et est visible sous le Kef-El-Assel au Nord-Ouest. À l'Ouest de Medjez, seul le flanc sud de cet anticlinal apparaît sous le Burdigalien transgressif.

3.4. La végétation

Le couvert végétal des bassins versants est un facteur important de ruissellement et d'érosion hydrique ; il a des effets complexes et contradictoires à la fois sur les paramètres climatiques (notamment l'évapotranspiration) et sur le bilan hydrique du sol.

La répartition du couvert végétal et la part de chaque type de couvert dans le bassin versant dépendent des caractéristiques climatiques qui en résultent. Le bassin versant de l'Oued K'sob a une plus grande superficie de végétation forestière qui représente 25 % de la superficie totale du bassin versant. Les raisons de cet avantage sont la présence d'importants reliefs montagneux (Djebel Maâdid), qui monopolisent une grande partie de la surface du bassin versant, et la mise en œuvre de plusieurs programmes de reboisement sur ces reliefs dans le cadre, tant pour la défense que pour la restauration des sols, c'est-à-dire protéger le périmètre du barrage de l'Oued K'sob.

Les terres cultivées représentent respectivement 55%, principalement réparties dans les plaines de Ras-El-Oued, Bordj Gh'dir, Bordj-Bou-Arredj, et sont dédiées à la culture céréalière en jachère. Les surfaces mal protégées ou dénudées ne représentent que 20%, car les pâturages sont très limités et les conditions pédoclimatiques (pente et épaisseur du sol, précipitations et température) favorisent encore les pratiques céréalières traditionnelles (Sara, 2016).

3.5. La sismicité :

Les études régionales d'aléa sismique réalisées jusqu'à présent constituent la base de la carte de zonage sismique, selon la même carte produite par le CGS (Centre de Recherche Appliquée en Génie Parasismique), le Nord de l'Algérie se caractérise par une sismicité modérée à élevée. Le territoire algérien est divisé en cinq zones sismiques, allant de séismes faibles à forts (Fig. 26) :

- ✓ **Zone 0** : Sismicité négligeable.
- ✓ **Zone I** : Sismicité faible.
- ✓ **Zone IIa et IIb** : Sismicité moyenne.
- ✓ **Zone III** : Sismicité élevée.

Selon la carte de zonage sismique de l'Algérie, la grande parti de bassin versant de l'Oued K'sob (Bordj Bou Arreridj) est située dans la zone **IIa** et le reste (M'sila) est située dans la zone **I**, donc cette zone est caractérisée par la sismicité moyenne à faible.

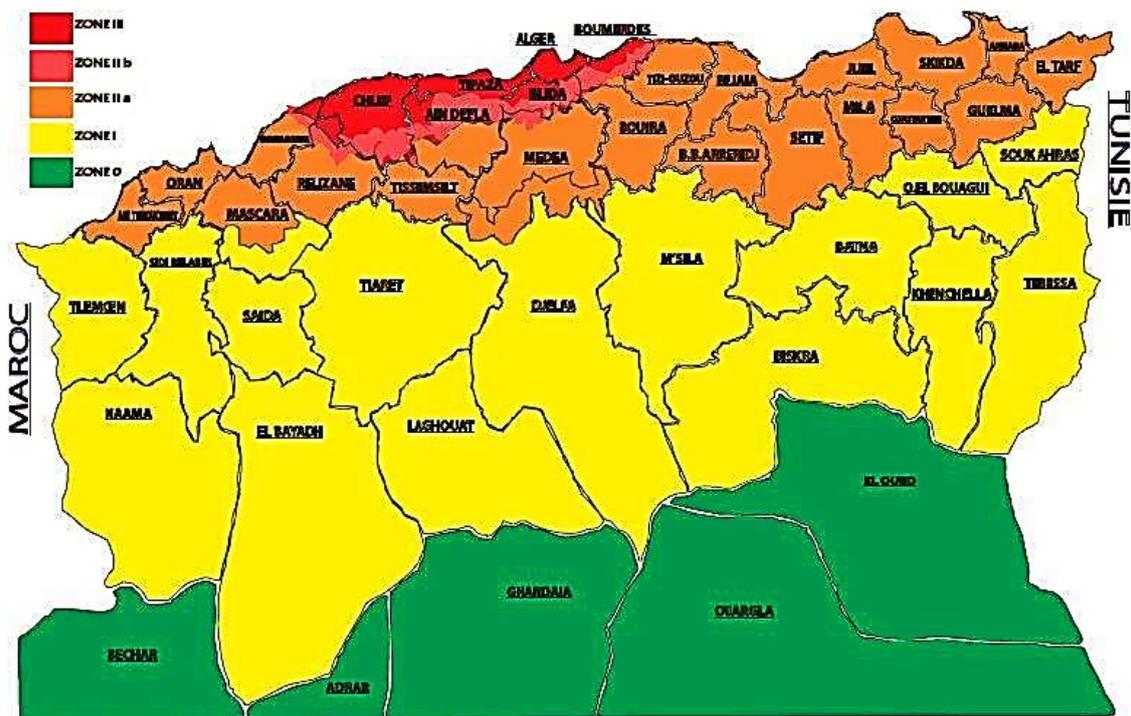


Fig. 26. Carte de zonage sismique de l'Algérie (CGS, 2003).

4. Conclusion

La zone d'étude fait partie du grand bassin versant du Hodna (26000 km²) et aussi des plaines de la Médjana.

Le bassin versant de l'Oued K'sob présente une superficie de 1750 km², un périmètre de 241.7 km. Il est caractérisé par un relief fort, une forme allongée avec un temps de concentration de 12.75 heures, et caractérisé par une densité de drainage de 8.68 km⁻¹.

Dans ce chapitre, nous avons dégagé les premières remarques sur l'évolution géologique de la région qui se compose de diverses unités lithologiques et géologiques (formes, failles, plis), qui conduisent toutes à une augmentation de l'érosion hydrique.

Partie 02

Etude Climatologique du bassin versant du K'sob

1. Introduction

Le climat est un facteur qui affecte directement de nombreux phénomènes comme l'érosion. Le changement climatique augmente le risque d'érosion hydrique. Par conséquent, l'étude des caractéristiques climatiques des bassins versants devient plus importante pour comprendre la nature de l'environnement.

Dans ce chapitre, nous nous concentrons sur les facteurs clés qui déterminent le bilan hydrique, notamment les précipitations, la température et l'évapotranspiration. L'évapotranspiration, en particulier, joue un rôle essentiel dans l'apparition de l'érosion hydrique et est donc un facteur clé à prendre en compte lors de l'étude des bassins versants.

Le bassin versant de l'Oued K'sob se trouve dans une zone climatique semi-aride continentale, caractérisée par un été sec et chaud et un hiver froid. Ce type de climat est souvent associé à des épisodes de précipitations intenses et imprévisibles, ce qui peut contribuer à l'augmentation du risque d'érosion hydrique.

Pour mener notre étude, nous avons utilisé des données provenant de la station de Bordj-Bou-Argeridj, où une série d'observations météorologiques a été collectée sur une période de 30 ans, allant de septembre 1989 à août 2019. Ces données nous ont permis de mieux comprendre les caractéristiques climatiques du bassin versant de l'Oued K'sob et de mieux évaluer le risque d'érosion hydrique dans la région.

2. Etude des paramètres climatologiques

Le bassin versant de l'Oued K'sob est influencé par diverses stations, mais malheureusement, les données provenant de ces stations sont souvent limitées ou inexistantes. Dans cette étude, nous avons donc choisi de nous appuyer sur la station pluviométrique de Bordj-Bou-Argeridj pour recueillir des données sur les précipitations dans la région. Cette station a été sélectionnée pour sa fiabilité et son accessibilité, ainsi que pour la disponibilité de données à long terme, ce qui nous a permis d'avoir une perspective sur la variabilité saisonnière et interannuelle des précipitations dans la région.

Le *Tab. 6* ci-dessous fournit des informations supplémentaires sur la station de Bordj-Bou-Argeridj, y compris son code et ses coordonnées géographiques. Cette station est située dans la région des Hauts Plateaux de l'Algérie, qui est sujette à des fluctuations climatiques importantes. Les données provenant de cette station ont été utilisées pour évaluer les tendances des précipitations dans la région de l'Oued K'sob au fil des ans.

Tab.6. Les coordonnées de la station pluviométrique de Bordj-Bou-Arreridj.

	Code	Coordonnées (km)		Altitude (m)	Période
		X	Y	Z	
Station de Bordj-Bou-Arreridj	050905	685.739	310.068	922	1989-2019

2.1. La pluviométrie

Les précipitations sont une composante essentielle du cycle de l'eau et ont une influence majeure sur les écosystèmes terrestres. Elles peuvent varier considérablement selon l'emplacement géographique, l'altitude, la latitude et les saisons. Les précipitations peuvent être liquides (pluie) ou solides (neige, grêle), et leur distribution dans le temps et dans l'espace peut être très hétérogène.

Dans le contexte de notre zone d'étude, le bassin versant de l'Oued K'sob, les précipitations sont influencées par de nombreux facteurs, notamment l'altitude. Les montagnes environnantes reçoivent souvent des quantités de précipitations plus importantes que les zones les plus basses. De plus, les précipitations sont également soumises à des variations saisonnières, avec des périodes de sécheresse et des périodes de pluies abondantes.

2.1.1. Précipitations annuelles

L'étude des variations des précipitations annuelles dans notre zone étude montre une grande variation dans le temps et dans l'espace à l'échelle de 30 ans (1989-2019). Le Tab. 7 ci-dessous donne les valeurs moyennes annuelles de pluviométrie mesurées par la station.

Tab.7. Valeurs des précipitations moyennes annuelles (1989-2019).

Année	Précip Annul
1989-1990	338,60
1990-1991	487,20
1991-1992	270,20
1992-1993	221,20
1993-1994	515,50
1994-1995	439,30
1995-1996	255,10
1996-1997	373,70
1997-1998	257,20
1998-1999	336,10
1999-2000	322,40
2000-2001	277,50
2001-2002	524,80
2002-2003	529,10
2003-2004	375,10
2004-2005	374,90
2005-2006	472,40
2006-2007	397,80
2007-2008	465,50
2008-2009	415,70
2009-2010	404,40
2010-2011	396,10
2011-2012	396,60
2012-2013	346,30
2013-2014	294,50
2014-2015	395,00
2015-2016	297,90
2016-2017	183,50
2017-2018	564,90
2018-2019	418,60
Moyenne	378,24

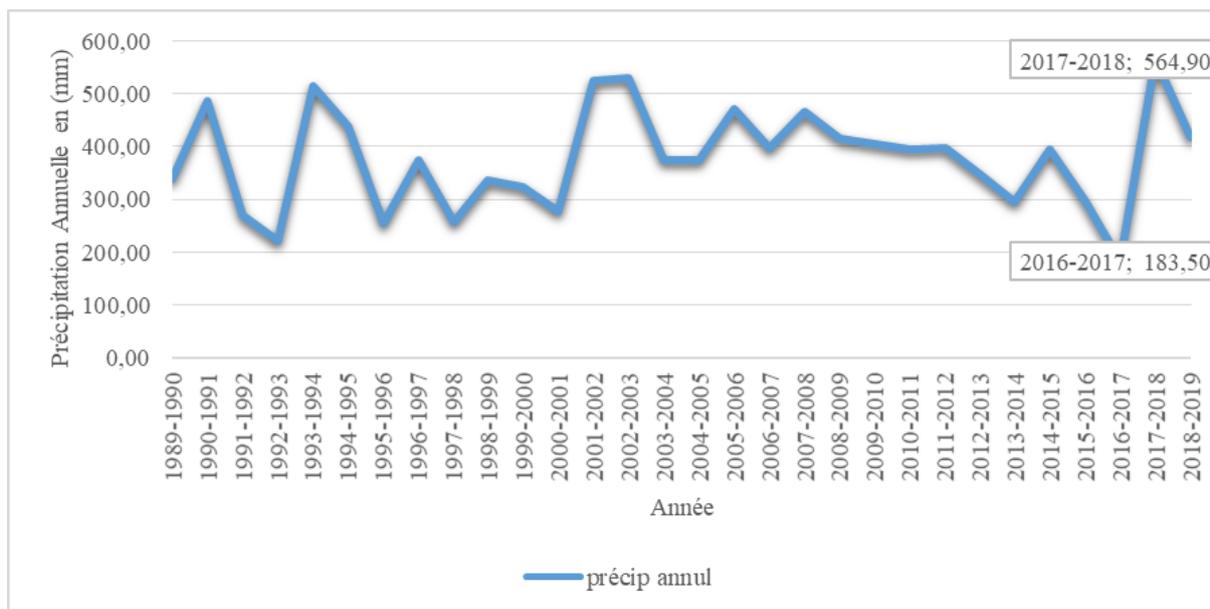


Fig.27. Variations des précipitations moyennes annuelles en mm (1989-2019).

L'analyse de la courbe des variations annuelles des précipitations (Fig. 27 et Tab.7) sur une période de 30 ans (1989-2019) montre que :

- L'année (2017-2018) est la plus arrosée avec 564,90mm.
- L'année (2016-2017) est la plus sèche avec 183,50mm.

2.1.2. Précipitations mensuelles

Pour avoir un aperçu de la variation des précipitations mensuelles à l'échelle de la région Tab.8 ci-dessous illustre les précipitations moyennes mensuelles pour la station sur 30 ans d'observation allant de 1989 à 2019 :

Tab.8. Valeurs des précipitations moyennes mensuelles en mm (1989-2019).

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Max	Min	Annu
Moy	51,32	31,59	33,26	35,90	38,33	29,15	35,50	38,80	37,80	21,78	9,87	14,93	51,32	9,87	378,24

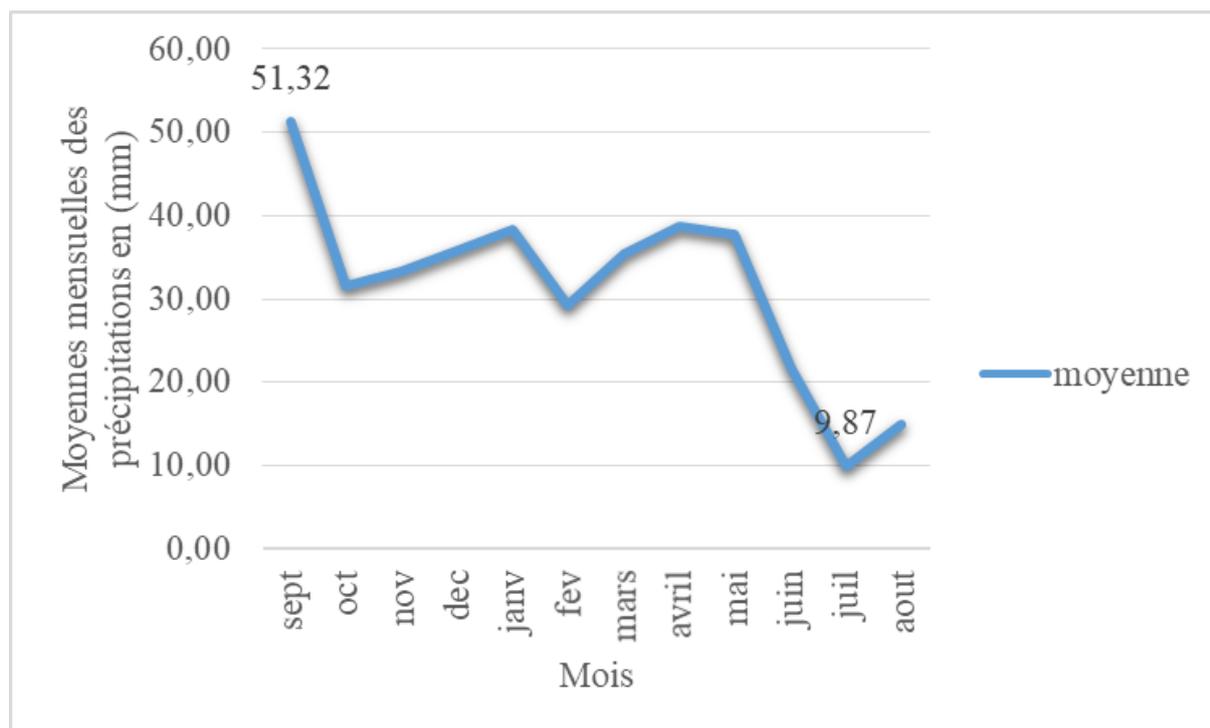


Fig.28. Variations des précipitations moyennes mensuelles en mm (1989-2019).

D'après le Tab. 8 et la Fig. 28 illustrant la répartition des précipitations mensuelles, sur une période de 30 ans (1989-2019), on constate que :

- La valeur maximale de précipitation est en mois de Septembre avec 51.32mm.
- La valeur minimale de précipitation est en mois de juillet avec 9.87mm.

2.1.3. La répartition saisonnière des précipitations

Nous calculons les précipitations par saison afin de connaître la saison la plus humide, ce qui crée des problèmes et exacerbe l'érosion hydrique.

Tab.9. Valeurs des précipitations saisonnières (1989-2019).

Saison	Automne	Hiver	Printemps	Été
Quantité (mm)	38.7	34.5	37.4	15.5
Quantité (%)	30,7	27,4	29,7	12,3

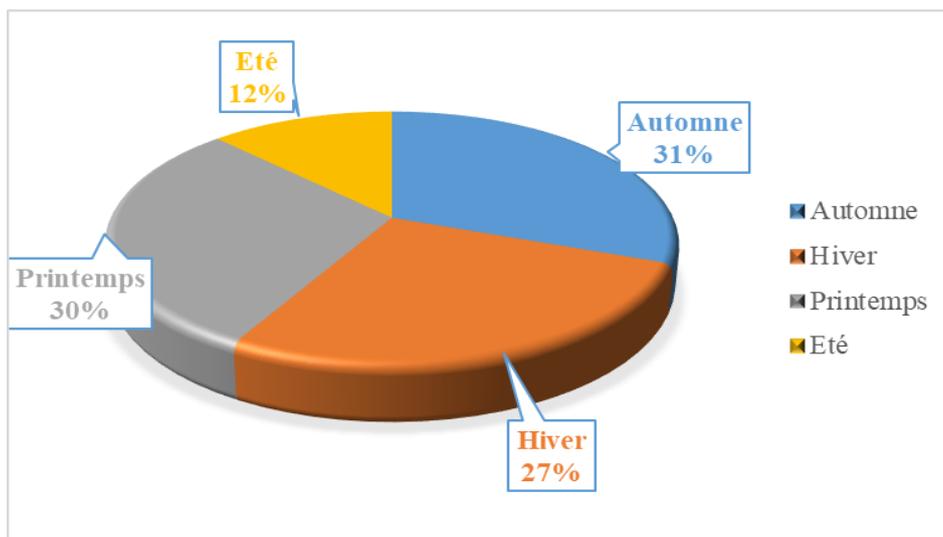


Fig.29. Variations des précipitations saisonnières en mm (1989-2019).

D'après le Tab.9 et la Fig. 29, on remarque que la saison d'Automne est la plus arrosée avec 38.7mm, tandis que l'Eté est la saison la moins arrosée avec 15.5mm.

2.1.4. Le coefficient pluviométrique

Ce paramètre climatique joue un rôle important dans la détermination des années excédentaires et déficitaires. Il est défini par le rapport de la pluviométrie de l'année à la pluviométrie moyenne de la station :

$$H = \frac{P}{Pa}$$

Avec :

H : coefficient pluviométrique ;

P : pluviométrie de l'année donnée en (mm) ;

Pa : pluviométrie moyenne en (mm).

- Si **H** > 1 : l'année est excédentaire.

- Si **H** < 1 : l'année est déficitaire.

Tab.10. Coefficient pluviométrique de la station de Bordj-Bou-Arreidj (1989-2019).

AD : année déficitaire ; AE : année excédentaire.

Station de Bordj-Bou-Arreidj			
Année	Hauteur annuelle des pluies (P)	Coefficient (H)	Observation
1989-1990	338,60	0.89	AD
1990-1991	487,20	1.29	AE
1991-1992	270,20	0.71	AD
1992-1993	221,20	0.59	AD
1993-1994	515,50	1.36	AE
1994-1995	439,30	1.16	AE
1995-1996	255,10	0.67	AD
1996-1997	373,70	0.99	AD
1997-1998	257,20	0.68	AD
1998-1999	336,10	0.89	AD
1999-2000	322,40	0.85	AD
2000-2001	277,50	0.73	AD
2001-2002	524,80	1.39	AE
2002-2003	529,10	1.39	AE
2003-2004	375,10	0.99	AD
2004-2005	374,90	0.99	AD
2005-2006	472,40	1.25	AE
2006-2007	397,80	1.05	AE
2007-2008	465,50	1.23	AE
2008-2009	415,70	1.09	AE
2009-2010	404,40	1.07	AE
2010-2011	396,10	1.05	AE
2011-2012	396,60	1.05	AE
2012-2013	346,30	0.92	AD
2013-2014	294,50	0.78	AD
2014-2015	395,00	1.04	AE
2015-2016	297,90	0.88	AD
2016-2017	183,50	0.49	AD
2017-2018	564,90	1.49	AE
2017-2019	418,60	1.11	AE
Moyenne (Pa)	378,24		/

D'après les résultats du *Tab. 10* ci- dessus, on remarque que la station de Bordj-Bou-Arreidj a subi 14 années déficitaires et 16 années excédentaires.

2.2. Températures

La température est un paramètre clé dans l'évaluation du bilan hydrique et des régimes d'écoulement des rivières. Elle peut influencer la quantité d'eau disponible pour les différentes activités socio-économiques, telles que l'irrigation, la production d'énergie, la navigation et bien d'autres. Dans la zone d'étude, la température est un facteur important qui affecte l'écosystème et la santé humaine. En effet, la région est caractérisée par un climat semi-aride avec des températures élevées pendant l'été et des hivers très froids. Les extrêmes de température peuvent avoir des impacts négatifs sur l'agriculture, la faune et la flore, ainsi que sur la qualité de vie de la population locale.

La station climatologique de Bordj-Bou-Arreidj, gérée par l'Office National de la Météorologie (O.N.M), est la principale source de données pour l'étude des températures dans la zone d'étude. Les données de la station ont été collectées sur une période de 30 ans, de 1989 à 2019, et permettent d'analyser les tendances et les variations dans le temps. En utilisant ces données, il est possible d'obtenir une vue d'ensemble des températures moyennes annuelles, mensuelles et saisonnières. Ces informations sont essentielles pour comprendre la dynamique du climat et son impact sur l'écoulement des eaux dans la région.

2.2.1. Températures annuelles

Les températures moyennes annuelles sur une période de 30 années (1989–2019), enregistrées dans la station de Bordj-Bou-Arreidj, font apparaître un hiver très froid et un été chaud, ce qui est une caractéristique typique du climat semi-aride.

Tab.11. Valeurs des températures moyennes annuelles en C° (1989-2019).

Année	T° Moy
1989-1990	15.55
1990-1991	14.54
1991-1992	13.86
1992-1993	15.31
1993-1994	16.03
1994-1995	15.25
1995-1996	15.01
1996-1997	15.93
1997-1998	15.70
1998-1999	16.12
1999-2000	16.55
2000-2001	16.51
2001-2002	16.37
2002-2003	15.87
2003-2004	15.55
2004-2005	15.77
2005-2006	15.60
2006-2007	15.93
2007-2008	15.59
2008-2009	15.27
2009-2010	15.80
2010-2011	16.20
2011-2012	15.73
2012-2013	15.45
2013-2014	16.23
2014-2015	16.27
2015-2016	16.32
2016-2017	17.19
2017-2018	15.28
2018-2019	16.43
	15.77

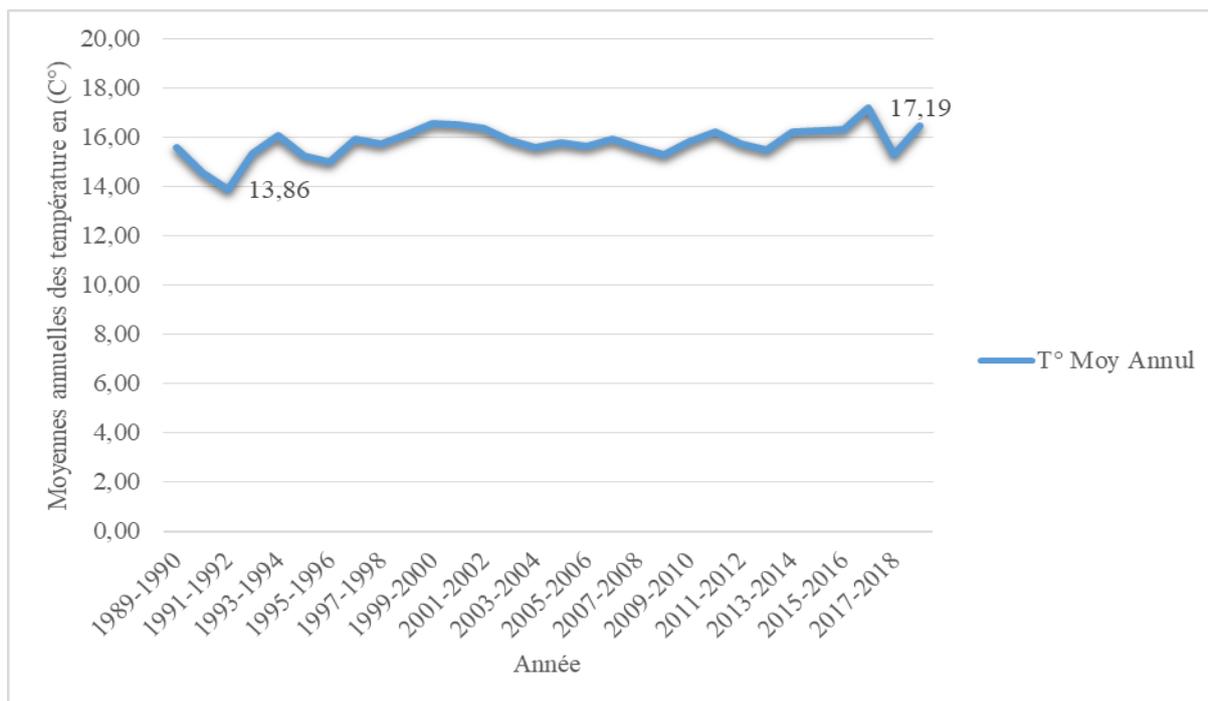


Fig.30. Les variations des températures moyennes annuelles en C° (1989-2019).

Le Tab. 11 et la Fig. 30 donnent la répartition annuelle des températures dans la zone d'étude, on note que l'année la plus chaude est de 2016 à 2017, avec une température moyenne annuelle de 17.19°C. En contrepartie, l'année la plus froide est de 1991 à 1992 avec une température moyenne annuelle de 13,86 C°.

2.2.2. Températures mensuelles

À l'échelle mensuelle, les variations sont peu importantes et relativement stables, à l'échelle d'une période de 30 ans (1989-2019) d'observation à la station de Bordj-Bou-Arreidj.

Tab.12. Valeurs des températures moyennes mensuelles en C° (1989-2019).

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aôut	Moy
T° Moy	21,40	16,59	10,54	7,32	6,16	6,98	10,22	13,37	18,33	23,98	27,66	26,73	15,77
T° Min	15,70	11,72	6,39	3,11	2,05	2,37	5,03	7,43	11,69	16,44	20,09	19,63	10,14
T° Max	28,44	22,85	15,74	11,71	11,10	12,39	16,15	19,45	24,90	31,52	35,16	34,28	21,95

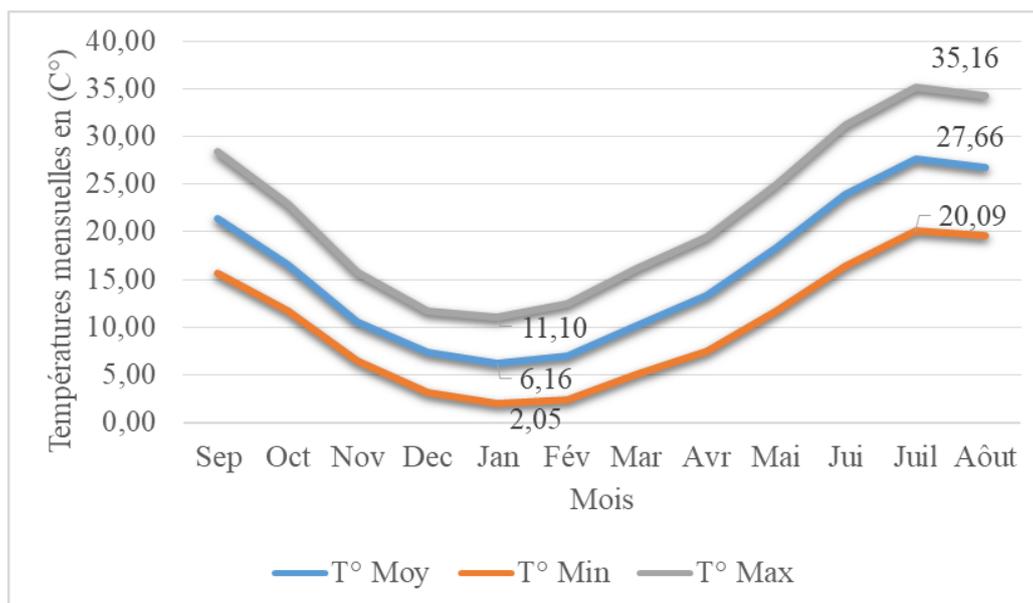


Fig.31. Variations des températures moyennes mensuelles en C° (1989-2019).

Selon le Tab. 12 et la Fig. 31 de la variation mensuelle de la température, nous observons que la valeur de la température moyenne mensuelle en juillet est la plus élevée à 27,66 C°, tandis que la température moyenne en janvier est la plus basse à 6,16 C°.

Les températures enregistrées montrent que le mois le plus froid de l'année est janvier, tandis que le mois le plus chaud est juillet.

2.2.3. Températures saisonnières

Nous calculons les températures en fonction de la saison pour savoir quelle saison a une température élevée et quelle saison a une température basse.

Tab.13. Valeurs des températures saisonnières (1989-2019).

Saison	Automne	Hiver	Printemps	Eté
Quantité (C°)	16.2	6.9	14.3	26.6
Quantité (%)	25.3	10.8	22.3	41.6

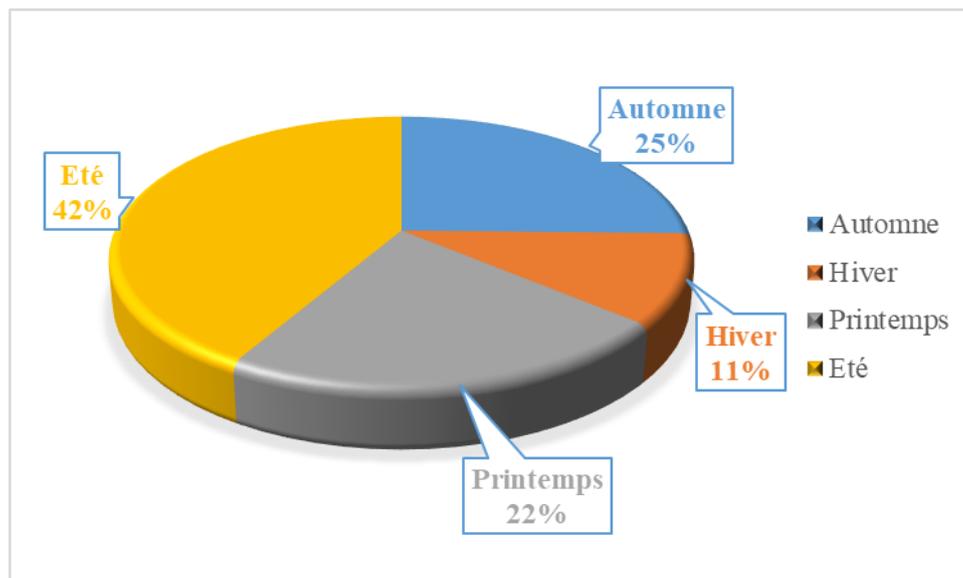


Fig.32. Les variations des températures moyennes saisonnières en C° (1989-2019).

Selon le *Tab.13* et la *Fig. 32*, l'analyse des répartitions saisonnières des températures montre que la saison hivernale est la plus froide avec 6.9 C°, tandis que la saison estivale est la plus chaude avec 26.6 C°.

2.3. Régime climatique

La zone d'étude du bassin versant de l'Oued K'sob est située dans la zone des hautes plaines telliennes. Elle est caractérisée par un climat semi-aride du type continental avec un été très chaud et sec et un hiver très froid.

2.3.1. Diagramme ombro-thermique

Le diagramme Ombro-thermique est un diagramme développé par F.Bagnouls et Gaussen en 1953. Pour eux, la période sèche est le total moyen des précipitations du mois qui est inférieur ou égal au double de la température moyenne ($P < 2T$), sur ce principe, le diagramme est établi à partir des précipitations et des températures mensuelles moyennes (*Tab. 14*), tout en prenant en considération l'échelle des ordonnées ($P=2*T$).

Tab.14. Tableau récapitulatif des précipitations et des températures (1989-2019).

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Moy
P (mm)	51,32	31,59	33,26	35,90	38,33	29,15	35,50	38,80	37,80	21,78	9,87	14,93	31,52
T (C°)	21,40	16,59	10,54	7,32	6,16	6,98	10,22	13,37	18,33	23,98	27,66	26,73	15,77

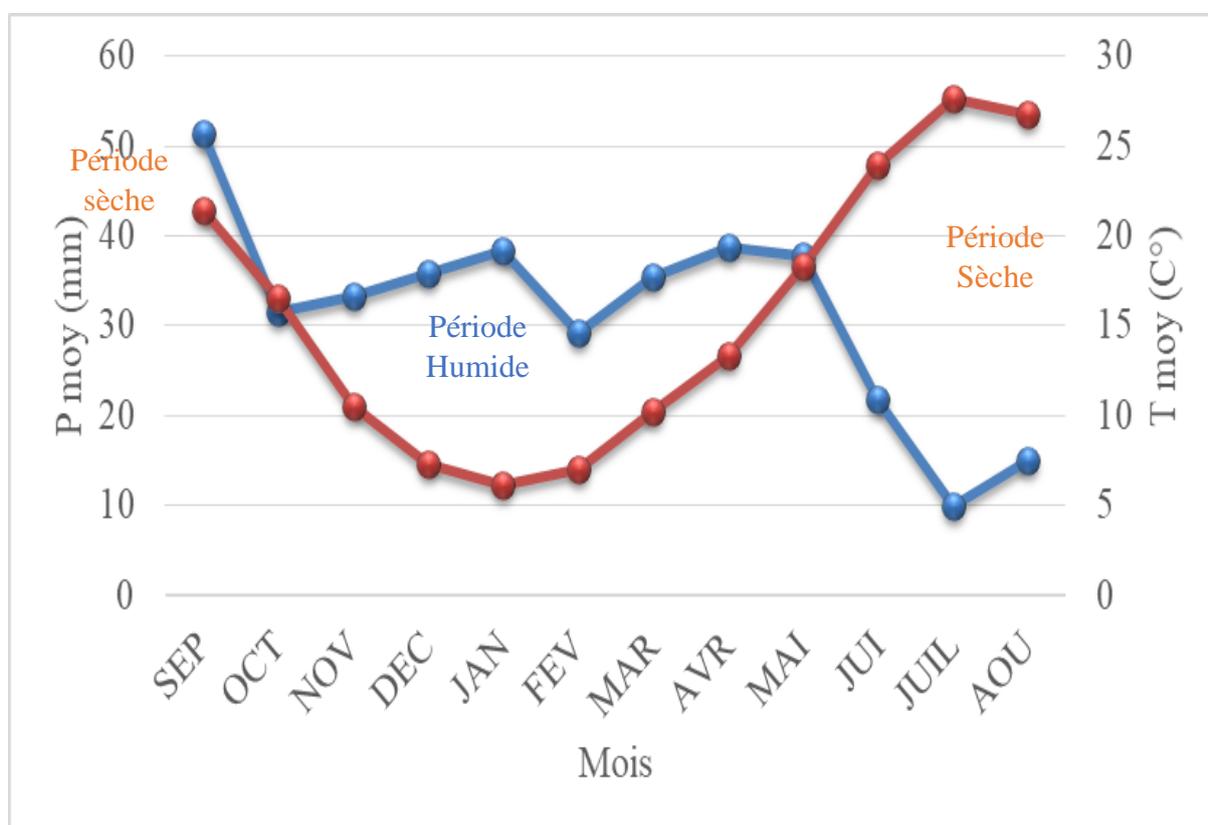


Fig.33. Diagramme ombro-thermiques du bassin versant l'Oued K'sob (1989-2019).

D'après l'analyse du diagramme pluvio-thermique de la zone d'étude (Fig. 33), il s'agit de huit mois humides qui s'étalent depuis Octobre jusqu'au mois de Mai et de quatre mois secs allant de Juin jusqu'au début d'Automne, c'est-à-dire au mois de Septembre.

2.3.2. Indice d'aridité

La formule d'Emmanuel est de Martonne calcule l'indice d'aridité, qui est en fonction des températures et des précipitations, définie par la relation suivante :

$$A = \frac{P}{(T + 10)} = \frac{378,24}{15,77 + 10} = 14,68$$

Avec :

A : indice d'aridité annuel ;

P : précipitation moyenne annuelle (mm) ;

T : température moyenne annuelle (C°).

Si :

$A < 5$: climat hyper-aride ;

$5 < A < 7,5$: climat désertique ;

$7,5 < A < 10$: climat steppique ;

$10 < A < 20$: climat semi-aride ;

$20 < A < 30$: climat tempéré ;

$A < 30$: climat humide.

À partir de la valeur obtenue de l'indice d'aridité, on conclut que le bassin versant de l'Oued K'sob appartient au climat semi-aride, ce qui est conforme à ce qui est connu pour la zone.

2.4. Evapotranspiration :

L'évapotranspiration est la quantité d'eau transférée vers l'atmosphère, par l'évaporation au niveau du sol et par la transpiration des plantes. Elle se définit par les transferts vers l'atmosphère de l'eau du sol, de l'eau interceptée par la canopée et des étendues d'eau (*Aussenac & Boulangeat, 1980*).

2.4.1. Estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP)

C'est la quantité maximale d'eau susceptible d'être perdue en phase vapeur, elle comprend l'évaporation de l'eau et la transpiration du couvert végétal.

L'ETP est calculée par la formule de C.W. Thornthwaite, qui utilise la température de l'air et l'altitude de la station. Elle est calculée par la relation :

$$ETP = \left(\frac{10T}{I}\right)^a$$

$$I = \sum i ; i = \left(\frac{T}{5}\right)^{1.514} ; a = \left(\frac{1.6}{100}\right)I + 0.5$$

Avec :

T : température moyenne mensuelle (C°) ;

a : constante fonction de I ;

i : indice thermique mensuel ;

I : Indice thermique annuel.

L'évapotranspiration potentielle corrigée (ETPc) est obtenue en multipliant la formule de Thornthwaite par le coefficient d'ajustement K (Tab. 15).

$$ETPc = ETP * K$$

Avec :

K : coefficient d'ajustement mensuel lié à l'attitude ;

I =74.3 ; a=1.6894.

Tab.15. Résultats de calcul de l'ETPc par les formules de Thornthwaite.

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juill	Aôut	Moy
i	9	6.1	3.1	1.8	1.4	1.7	3	4.4	7.1	10.7	13.3	12.7	74.3
I	74,3												
a	1.689												
K	1,03	0,97	0,86	0,81	0,87	0,85	1,03	1,1	1,21	1,22	1,24	1,25	
ETP	95.4	62,1	28,8	15,3	11,6	14,4	27,4	43,1	73.5	115.3	147.3	139.1	773.3
ETP c	98.3	60,2	24,8	12,6	10,1	12,2	28.2	47.4	88.9	141.2	182.6	161.3	868.1

2.4.2. Estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR)

C'est la quantité de la vapeur d'eau évaporée réellement. Elle est déterminée par des équations empiriques comme celles de Turc ou de Coutagne.

a. Formule de L. Turc :

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}}; L = 33 + 25T + 0.05T^3;$$

$$L = 33 + 25 * 15.77 + 0.05 * 15.77^3 = 623.34$$

$$ETR = \frac{378.24}{\sqrt{0.9 + \frac{378.24^2}{623.34^2}}}$$

$$ETR = 334.72 \text{ mm}$$

Avec :

P : précipitations annuelles moyennes (mm) ;

T : température annuelle moyenne (C°).

b. Formule d'A. Coutagne :

La formule d'A.Coutagne est donnée comme suit :

$$ETR = P - \lambda P^2 \text{ ou } \lambda = \frac{1}{0.8 + 0.14T}$$

$P > \frac{1}{2\lambda}$ dans ce cas, la formule de Coutagne n'est pas applicable pour la région d'étude.

c. Formule de Thornthwaite :

Si : $P > ETP \rightarrow ETR = ETP$;

Si : $P + RFU > ETP \rightarrow ETR = ETP$;

Si : $P + RFU < ETP \rightarrow ETR = P + RFU$;

Si : $P < ETP$ et $RFU = 0 \rightarrow ETR = P$.

$ETR \text{ moy} = 334.72 + 378.2/2$ donc **ETR moy = 356.46 mm.**

2.4.3. Etablissement du bilan hydrique selon C.W.Thornthwaite

Établir le bilan hydrique d'un bassin versant consiste à déterminer les paramètres qui le composent. Cette approche est basée sur le concept d'une RFU à avis réservé facile à utiliser. Le sol est supposé capable de stocker une certaine quantité d'eau (RFU), qui peut être absorbée par les plantes par évapotranspiration (ETP).

Tab.16. Bilan hydrique de la région d'étude d'une période d'observation allant de 1989 à 2019.

P : Précipitations moyennes mensuelles (mm) ; **T** : Températures moyennes Mensuelles (C°) ; **ETPc** : Evapotranspiration potentielle (mm) ; **BH** : Bilan hydrique ; **RFU** : Réserve facilement utilisable (mm) ; **ETR** : Evapotranspiration réelle (mm) ; **DA** : Déficit agricole (mm) ; **EXC** : Excédent (mm) ; **I** : Indice thermique annuel ; **K** : coefficient d'ajustement mensuel lié à la latitude.

	T°	I	K	ETPc	P	BH	CH	VR	RFU	ETR	Def	Exc
Sep	21,4	9,0	1,03	98,3	51,32	-47,0	-0,5	0,0	0,0	51,3	47,0	0,0
Oct	16,59	6,1	0,97	60,2	31,59	-28,7	-0,5	0,0	0,0	31,6	28,7	0,0
Nov	10,54	3,1	0,86	24,8	33,26	8,4	0,3	8,4	8,4	24,8	0,0	0,0
Déc	7,32	1,8	0,81	12,6	35,9	23,3	1,8	23,3	31,7	12,6	0,0	0,0
Jan	6,16	1,4	0,87	10,1	38,33	28,2	2,8	28,2	59,9	10,1	0,0	0,0
Fév	6,98	1,7	0,85	12,2	29,15	16,9	1,4	16,9	76,8	12,2	0,0	0,0
Mar	10,22	3,0	1,03	28,2	35,5	7,3	0,3	7,3	84,1	28,2	0,0	0,0
Avr	13,37	4,4	1,10	47,4	38,8	-8,6	-0,2	-8,6	75,5	47,4	0,0	0,0
Mai	18,33	7,1	1,21	88,9	37,8	-51,1	-0,6	-51,1	24,3	88,9	0,0	0,0
Jui	23,98	10,7	1,22	141,2	21,78	-119,4	-0,8	-24,3	0,0	46,1	95,1	0,0
Juill	27,66	13,3	1,24	182,6	9,87	-172,8	-0,9	0,0	0,0	9,9	172,8	0,0
Aout	26,73	12,7	1,16	161,3	14,93	-146,3	-0,9	0,0	0,0	14,9	146,3	0,0
Annuel	15,8	74,3		868,1	378,2	-489,8				378,2	489,8	0,0

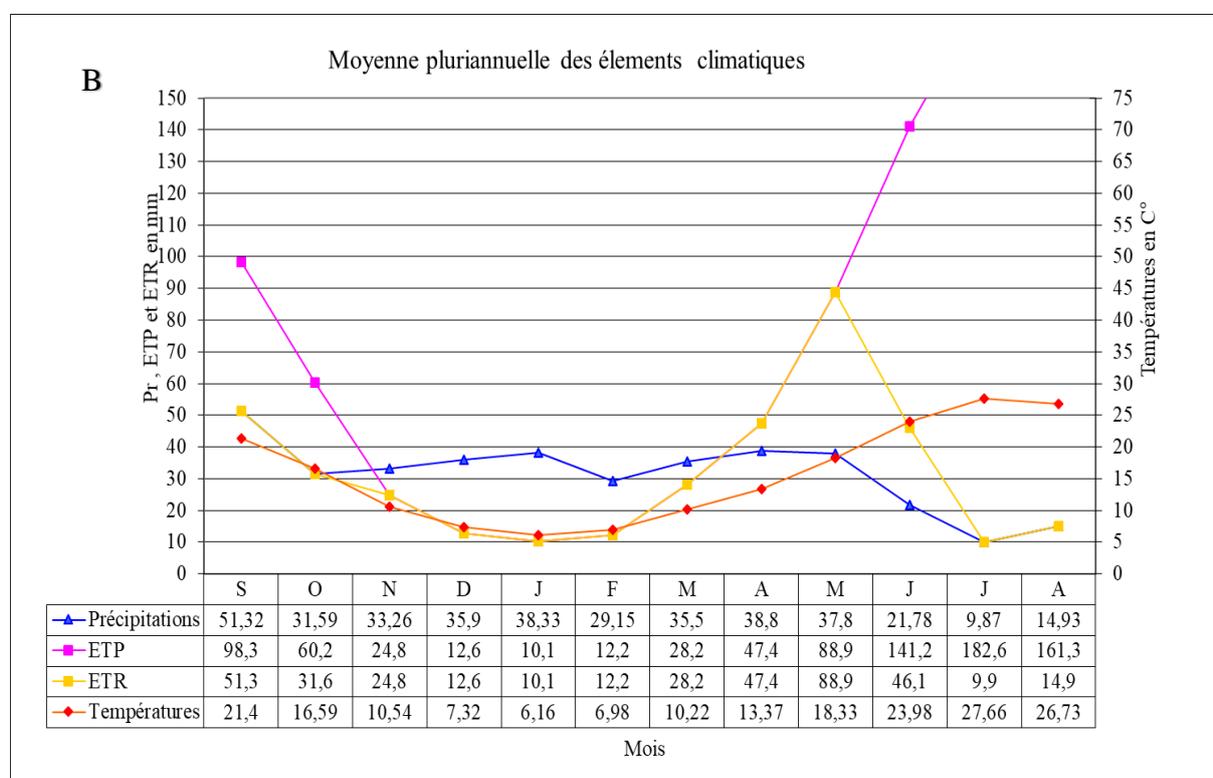
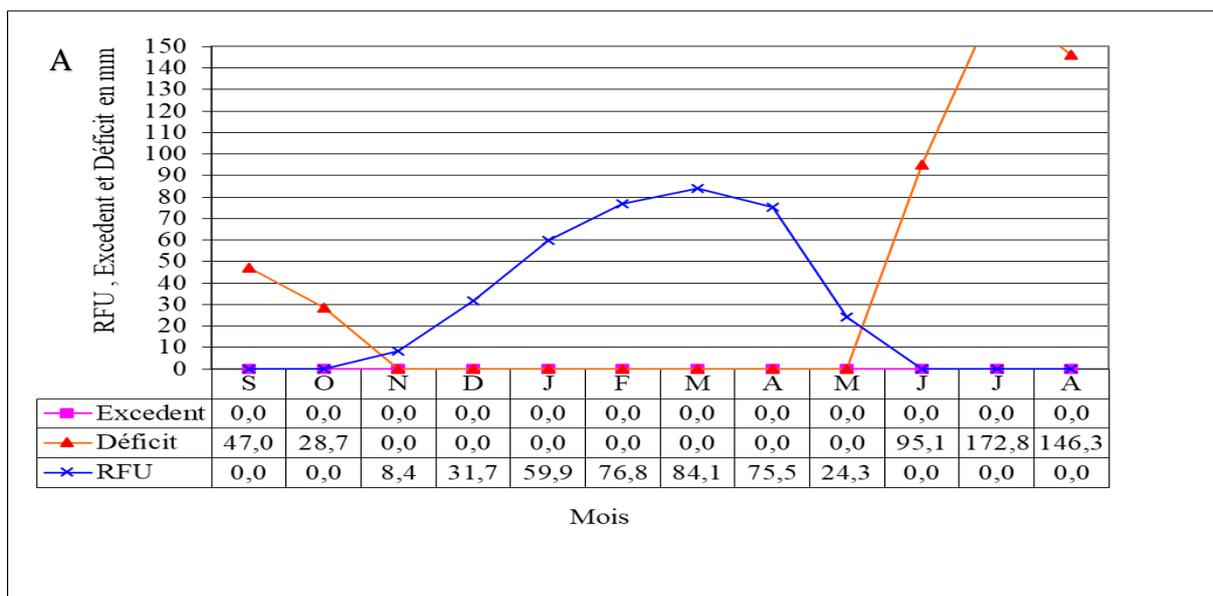


Fig.34(A.B). Bilan hydrique selon C.W.Thornthwaite.

Comme on peut le voir dans le Tab. 16 et la Fig. 34 (A et B), la valeur ETP est très élevée en été, atteignant un pic en juillet avec une valeur maximale de 182,6mm. En hiver, cependant, c'est l'inverse qui est vrai, avec des valeurs inférieures à 12mm, et une valeur minimale de 10,1mm qui est observée en janvier. Le déficit agricole s'est manifesté à partir de Juin et s'est poursuivi jusqu'en octobre. Nous avons remarqué que l'ETR a culminé en mai avec un maximum de 88,9mm. Il n'y a pas d'excédent.

2.4.4. Estimation du ruissellement

Le ruissellement de surface est la quantité d'eau qui, échappe à l'infiltration et à l'évapotranspiration lors d'une précipitation. Il est calculé par la formule empirique de Tixeront-Berkaloff :

$$R = \frac{P^3}{3(ETP)^2} = \frac{378.24^3}{3(868.1)^2} = 215.42 \text{ mm} = 56.95 \%$$

Avec :

R : ruissellement (mm) ;

P : précipitation moyenne annuelle (mm) ;

ETP : évapotranspiration potentielle (mm).

D'après les résultats obtenus, nous avons remarqué que la valeur du ruissellement est très élevée, ce qui augmente la vitesse d'écoulement des eaux de surface, et conduit à l'apparition d'érosion hydrique.

2.4.5. Estimation de l'infiltration

L'infiltration est le passage de l'eau de la surface de sol à l'intérieur du sous-sol, alimentant les écoulements souterrains et les nappes souterraines. Elle est calculée par la formule suivante :

$$I = P - (R + ETR) = 378.24 - (215.42 + 356.46) = -193.64 \text{ mm}$$

Avec :

P : précipitations moyennes annuelles (mm) ;

ETR : évapotranspiration réelle annuelle (mm) ;

R : ruissellement.

Dans ce cas la formule n'est pas applicable pour la zone d'étude parce qu'il n'y a pas d'excédent lorsqu'on calcule le bilan hydrique.

On note que, l'infiltration est nulle, ce qui va augmenter la formation d'un écoulement de surface, et donc le phénomène d'érosion hydrique augmente dans la région.

3. Conclusion

Après avoir analysé les données climatiques de la zone d'étude, nous avons observé que le bassin versant de l'Oued K'sob est soumis à un climat continental semi-aride, caractérisé par des hivers froids et des étés chauds. La température moyenne annuelle dans la région est d'environ 15,77 degrés Celsius. En ce qui concerne les précipitations, la moyenne annuelle est d'environ 378,24 millimètres, ce qui montre une certaine aridité.

Lorsque nous examinons l'évapotranspiration réelle, nous remarquons qu'elle est de 868,1mm. Cela signifie que la zone connaît une forte évaporation de l'eau du sol et de la végétation. L'estimation du ruissellement dans la zone est d'environ 215,42mm, ce qui représente la partie de l'eau de pluie qui s'écoule à la surface du sol et alimente les rivières. Cependant, l'infiltration est très faible dans la zone, ce qui signifie que la plupart de l'eau de pluie s'évapore ou s'écoule en surface.

Le déficit total d'eau dans la zone d'étude est estimé à 489,8mm. Cela indique que la région souffre d'un manque d'eau, ce qui peut avoir des conséquences négatives sur la végétation et les écosystèmes locaux. Il est important de noter qu'il n'y avait pas d'excédent d'eau, ce qui signifie que toutes les précipitations sont soit évaporées, soit drainées. Cette information est cruciale pour comprendre le bilan hydrique de la zone et pour prendre des décisions éclairées en matière de gestion des ressources en eau.

Chapitre 03

Données utilisées et Méthodologie

1. Introduction

Notre zone d'étude est au début de son exposition à l'érosion hydrique. Ce phénomène est le résultat de plusieurs facteurs différents : morphologiques, géologiques et humains. Tous ces facteurs ont un impact direct sur l'occurrence et l'évolution de l'érosion hydrique avec le temps.

Les données nécessaires à la cartographie de la susceptibilité d'érosion hydrique dans la zone d'étude sont 11 facteurs de prédisposition sélectionnés comme données d'entrées pour les modèles. Ces facteurs comprennent : l'altitude, le degré de pente, l'exposition des versants, la courbure du plan, la courbure du profile, la proximité aux routes, la proximité aux failles, la proximité aux réseaux hydrographiques, l'indice d'humidité topographique (TWI), l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) et la lithologie.

2. Description de la zone d'étude

Le bassin versant du K'sob est situé dans le grand bassin du Hodna au Nord de l'Algérie, et s'étend sur la partie Sud de Bordj-Bou-Argeridj, avec son exutoire à l'extrémité Nord de M'Sila. Il est délimité au Nord et au Nord-Ouest par la chaîne des Bibans ; au Sud et au Sud-Ouest par les montagnes du Hodna et à l'Est par les hauts plateaux Sétifiens. Il est situé entre $04^{\circ}28'37''E$ - $05^{\circ}10'00''E$ et $35^{\circ}43'27''N$ - $36^{\circ}09'53''N$ (WGS_1984_UTM_31 N) et couvre une superficie de 1570 km^2 (Fig. 35).

Le bassin versant du K'sob se caractérise par un terrain accidenté et varié avec des montagnes à proximité et un vaste plateau au centre. Les altitudes maximale et minimale sont de 1865 m dans la partie Sud-Est près des villes de Maâdid, Rabta, Ghilassa, Taglait et Ras-El-Oueld, et 478 m dans la ville de M'tarfa, dans la partie Sud-Est du bassin versant.

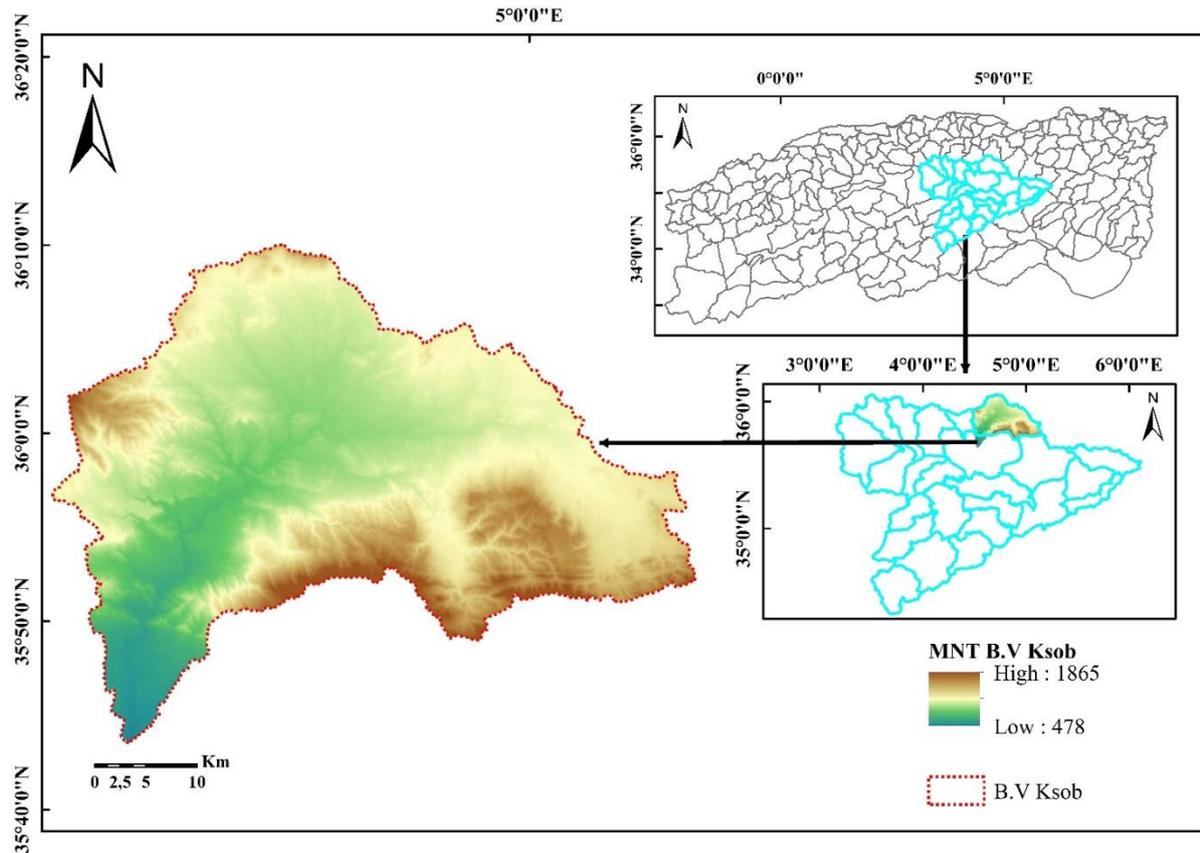


Fig.35. Carte de localisation de la zone d'étude.

La zone d'étude est caractérisée par un climat semi-aride, avec des précipitations moyennes de 378,24 mm ; la température moyenne annuelle est de 15,77° C°. Les principales précipitations ont lieu entre Septembre et Avril, tandis que la sécheresse estivale s'étend de Juin à Août.

3. Méthodologie du travail

3.1. Acquisition des données

L'objectif principal de ce chapitre est de cartographier les facteurs influençant l'érosion hydrique. Pour cela, Nous avons créé une base de données en utilisant la version 10.4 du logiciel ArcGIS.

(1) Nous avons utilisé 5 cartes géologiques 1/50000 (Bordj-Bou-Argeridj, Ain-Taghrout, Ras-El-Oued, Maâdid et M'sila) pour obtenir la carte lithologique ainsi que la carte des failles de la zone d'étude.

(2) À partir de la résolution du modèle numérique de terrain (MNT) (30×30 m) et des données satellitaires, nous avons dérivé différentes cartes : la proximité aux routes, la proximité

aux réseaux hydrologiques, pentes, exposition des versants, altitudes, NDVI, TWI, courbure du plan et courbure du profile.

(3) Toutes ces données ont été projetées en utilisant un système de projection Universal Transverse Mercator (UTM) avec référence spatiale (WGS 1984 UTM Zone 31N). Les cartes résultantes ont été utilisées comme facteurs de prédisposition pour évaluer la susceptibilité à l'érosion en ravines de notre zone d'étude.

3.2. Construction de la carte d'inventaire

La carte d'inventaire joue un rôle important dans l'étude des relations entre les variables dépendantes et les variables indépendantes explicatives. Elle permet d'obtenir une base de données géographique pour localiser les zones d'érosion hydrique et ainsi produire une carte de susceptibilité de l'érosion hydrique. L'inventaire des sites permet d'indiquer les caractéristiques et les dimensions de ce phénomène (*Achour et al., 2018*).

Au cours de notre travail, nous avons tout d'abord identifié les sites d'érosion en ravines grâce à des visites sur le terrain effectuées entre Février 2020, Mars 2020, Avril 2020 et Mai 2020, qui ont permis de localiser 565 formes d'érosion.

Deux méthodes distinctes ont été employées pour cartographier l'inventaire d'érosion hydrique, à savoir :

- ✓ **Méthode 01** : Localisation visuelle des formes d'érosion à partir des images satellitaires ;
- ✓ **Méthode 02** : Confirmation du travail effectué dans la phase 01 par la localisation des formes d'érosion sur le terrain à l'aide du GPS.

Ces visites ont été effectuées afin de pouvoir détecter plus facilement les zones à fortes densités de l'érosion en ravines. Lors de ces visites, deux récepteurs GNSS bi-fréquence, composés de stations mobiles, ont été utilisés pour effectuer des mesures de terrain. Les récepteurs GNSS sont Topcon GR-5 et Topcon HiPer V. Le GR-5 et HiPer V intègrent la puce GNSS Vanguard multi-constellation 226 canaux avec la fonction Universal Tracking Channel.

Cette technique utilise des méthodes de suivi polyvalentes et dynamiques pour sélectionner et suivre automatiquement tout signal satellite disponible, permettant aux utilisateurs des solutions Topcon de recevoir le maximum de signaux et de mesures à tout moment. Ceux-ci recueillent les données du satellite sous forme de GPS différentiel, avec une précision horizontale de $2,5 \text{ mm} \pm 2 \text{ ppm}$ et verticale de $5 \text{ mm} \pm 2 \text{ ppm}$ (*Fig. 36*).

Les lieux d'érosion hydrique ont été dessinés sous forme de polygones et répartis aléatoirement en deux groupes : 70 % pour la construction des modèles et 30 % pour la validation.



Fig.36. Le matériel de terrain utilisé : les récepteurs GNSS bi-fréquence.

Quelques exemples de l'érosion en ravines sont présentés dans la (Fig. 37).



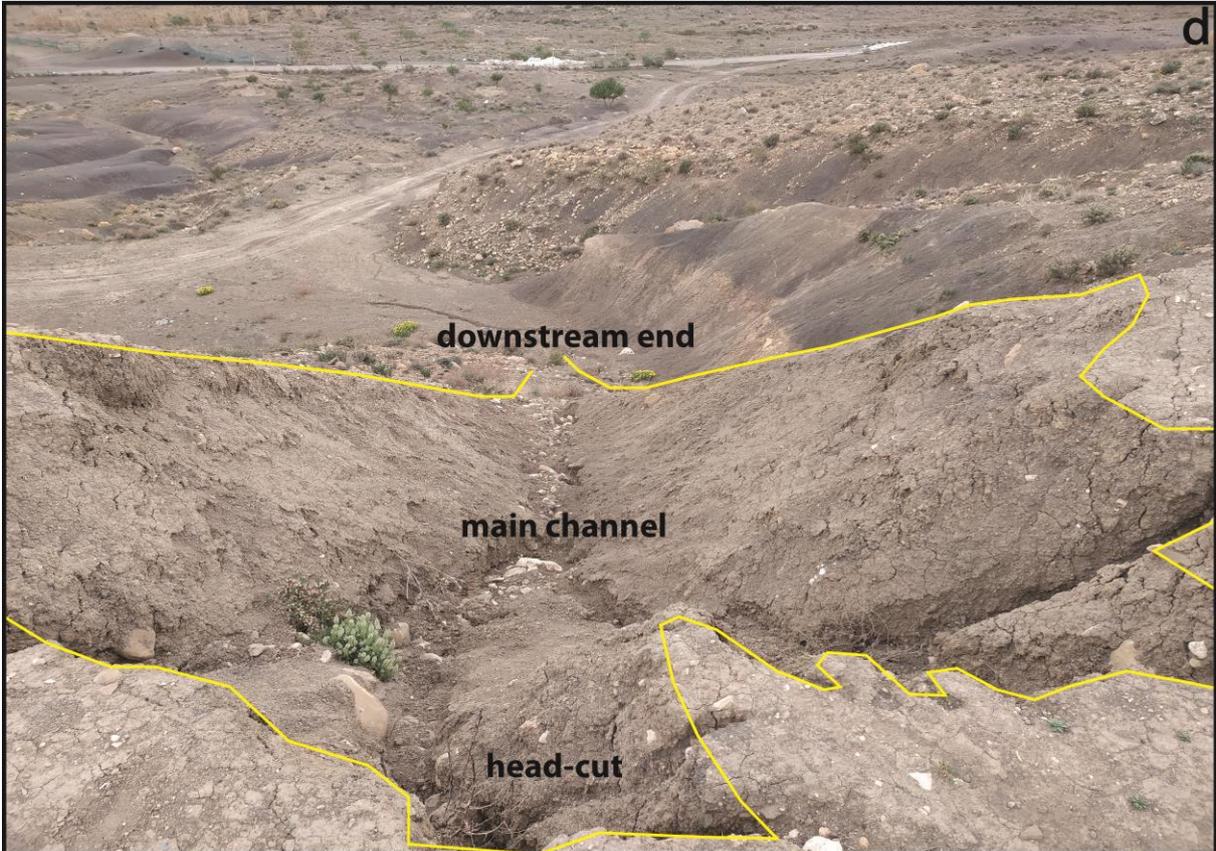




Fig.37. Quelques exemples de l'érosion en ravines : **a-** Tuyauterie du sol dans un matériau dispersif ($X = 4^{\circ}47'33''$, $Y = 35^{\circ}59'10''$), **b-** formation de l'érosion en ravines voisine d'un cours d'eau, **c-** l'érosion en ravines et l'érosion en nappe sévère dans la partie Nord-Est de la zone d'étude, **d-** le ravin actif est prolongé par l'érosion, **e-** érosion en ravines à travers un sol meuble.

Dans cet inventaire, 565 sites d'érosion en ravines ont été enregistrés et vérifiés par grand travail sur terrain. Les trois parties mentionnées dans la (Fig.37d) ont été étudiées pour l'érosion en ravines longues, tandis que pour les courtes, l'emplacement du head-cut est considéré. L'érosion en ravines a été enregistrée sous forme de polygone, puis converties en points de l'érosion en ravines (format pixel) à l'aide de la méthode de centroïde dans QGIS. Cependant, étant donné que la sélection du modèle correspond à un type de présence-absence, nous avons choisi un nombre égal d'emplacements d'absence, au hasard. Cela crée un ensemble de données équilibré pour des tests ultérieurs. Pour déterminer ces emplacements, 565 emplacements aléatoires ont été sélectionnés dans un environnement SIG.

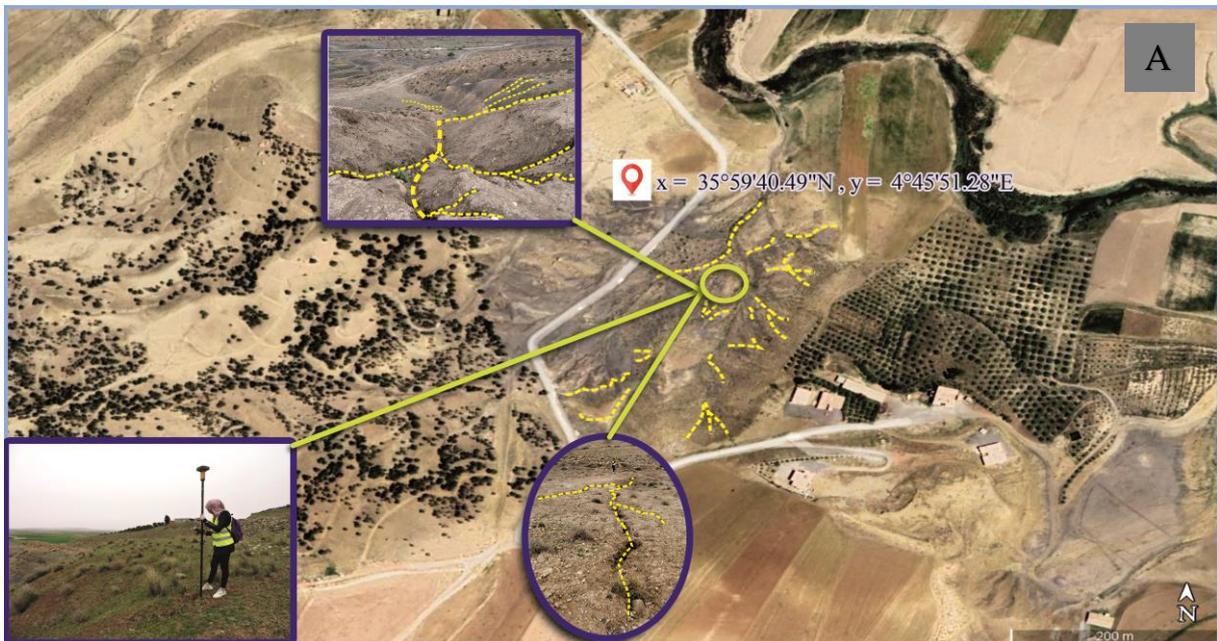
Pour réduire le biais de modélisation, nous avons généré des points d'absence à une distance de 300 m de l'érosion en ravines. Les principales caractéristiques de l'érosion en ravines (profondeurs, largeurs, longueurs et formes) varient d'une ravine à l'autre dans la zone d'étude. La profondeur varie de 1 à 2 m à 3 - 4 m avec des sections transversales en forme de V sur les terres agricoles et en forme de U sur les pâturages. La plus petite érosion en ravine identifiée sur le terrain a une superficie de 0,000406 km², tandis que la plus grande a une

superficie de 1,23 km². L'érosion en ravines couvre environ 11 km² de la zone d'étude de 1570 km², soit environ 0,7%. Comme on peut le voir sur la Fig.39, la distribution de l'érosion en ravines est plus prononcée dans la partie Nord du bassin versant de la rivière K'sob.

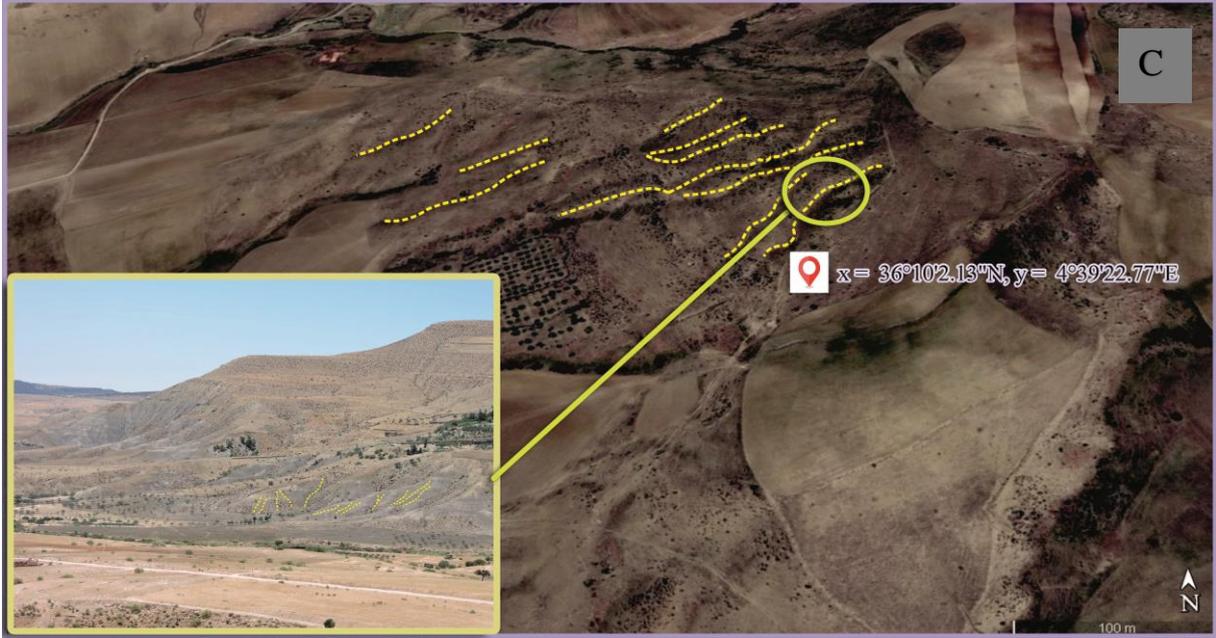
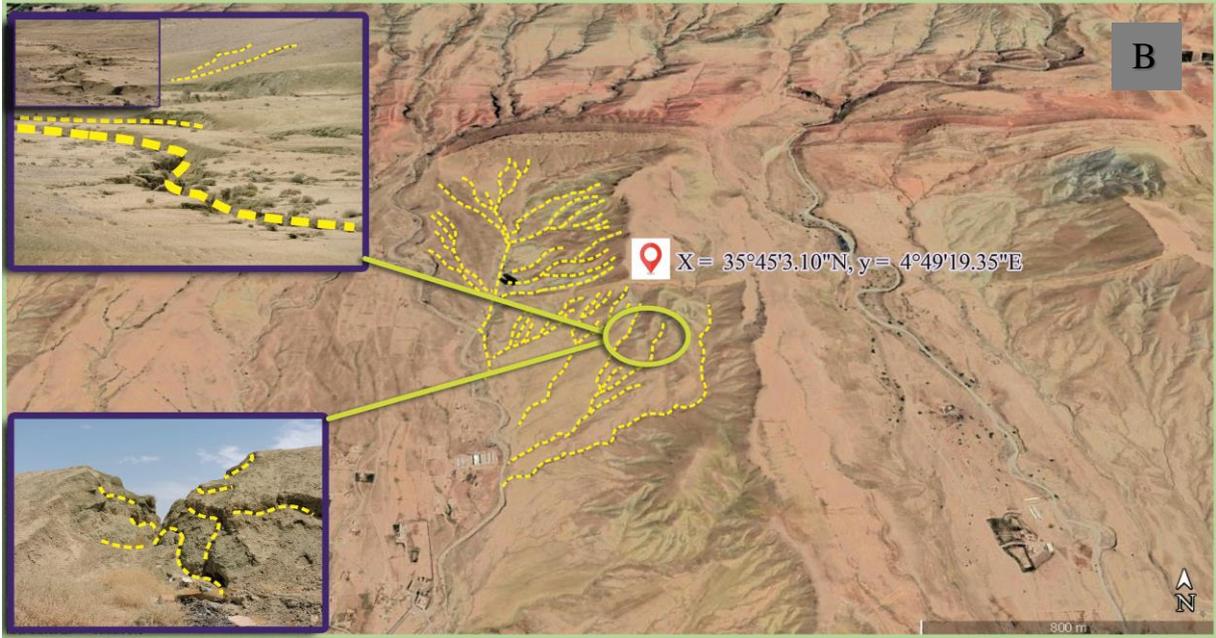
Un processus important lié à l'érosion en ravines est apparu dans la zone d'étude, il s'agit du piping (Fig. 37a). Les tuyaux creusent les sols et créent des formes en tunnel. La cause principale de la création de ces caractéristiques est l'infiltration à travers des formations géologiques sensibles et fragiles (Argile, Marne). Dans cette étude, 70% (1032 cellules quadrillées) de l'érosion en ravines font partie des données d'entraînement. Les 30% restants (443 cellules quadrillées) représentent les données de test.

Dans un second temps, une carte d'inventaire de l'érosion en ravines a été élaborée à partir des données obtenues sur le terrain, ainsi que par l'analyse de quelques images satellitaires pour connaître les lieux d'érosion hydrique afin de les identifier à l'aide Google Earth.

La Fig.38 propose quelques exemples des images satellitaires montrant l'érosion hydrique déjà localisés sur la zone d'étude.



Chapitre 03 : Données utilisées et Méthodologie



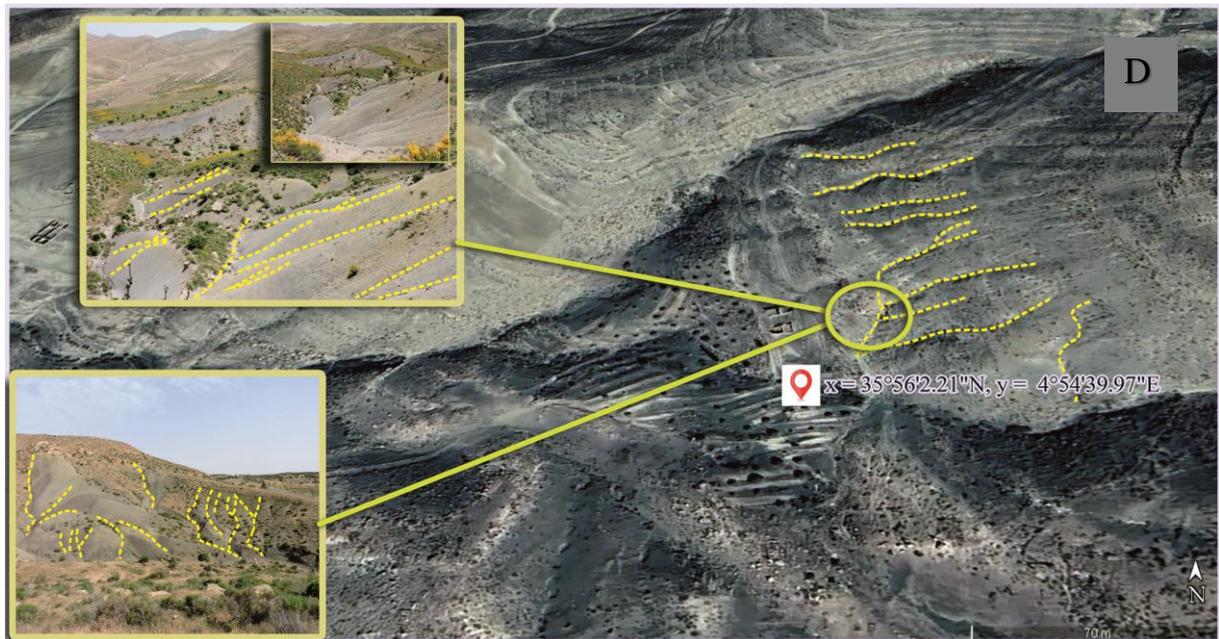


Fig.38. Images montrant certains des événements référencés sur Landsat 7 : A. El Hammadia, BBA, Algérie ; B. Maâdid, BBA, Algérie ; C. Medjana, BBA, Algérie ; D. Bordj Ghdir, BBA, Algérie ; E. Oued K'sob, BBA, Algérie.

La Fig. 39 montre la carte d'inventaire de l'érosion hydrique pour la zone d'étude, qui a été vérifiée sur le bureau, où sont transférées les données obtenues, les vérifier et les convertir en polygones de différentes tailles en utilisant d'un environnement SIG (ArcGIS) sous forme de fichier Shapefile.

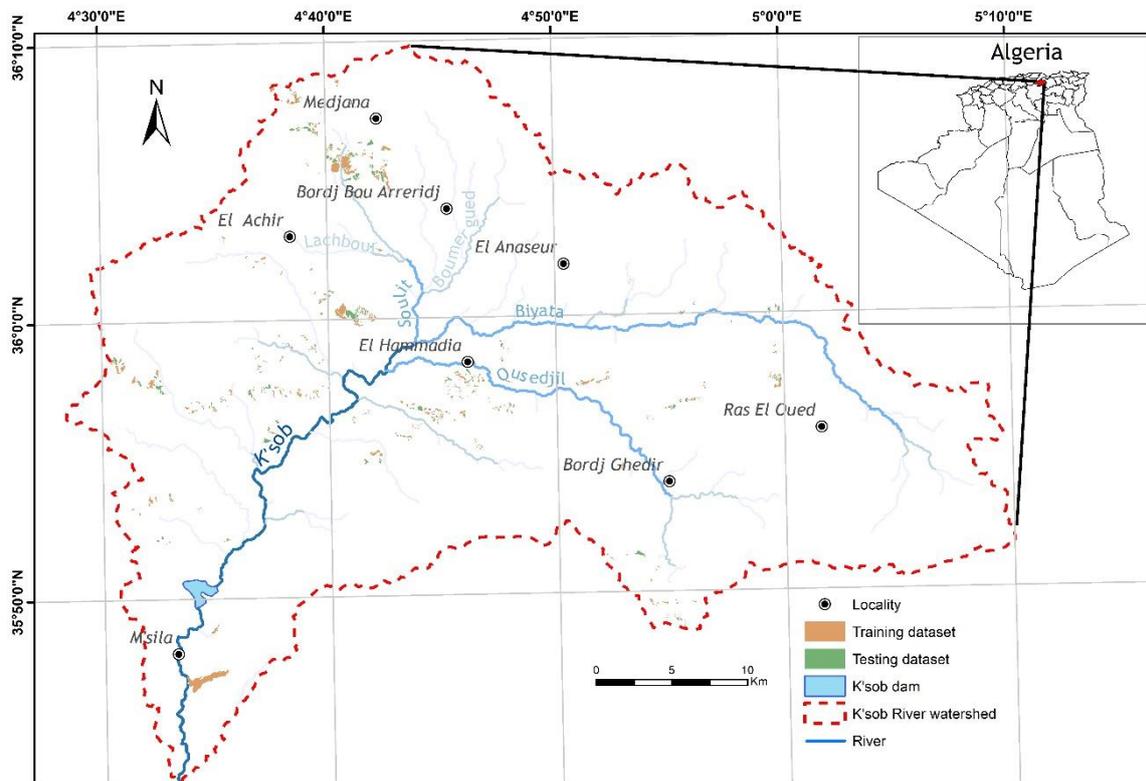


Fig.39. localisation et carte d'inventaire de la zone d'étude.

La Fig. 40 permet d'effectuer une comparaison quantitative du nombre d'érosions hydriques identifiées dans chacun des trois inventaires disponibles pour la zone d'étude. Cette comparaison révèle des différences significatives dans le nombre de phénomènes inventoriés. Plus précisément, l'inventaire basé sur les données d'archives ne répertorie aucune érosion hydrique tandis que l'inventaire basé sur la photo-interprétation en identifie 111 et celui basé sur l'inventaire terrain permet d'identifier 565.

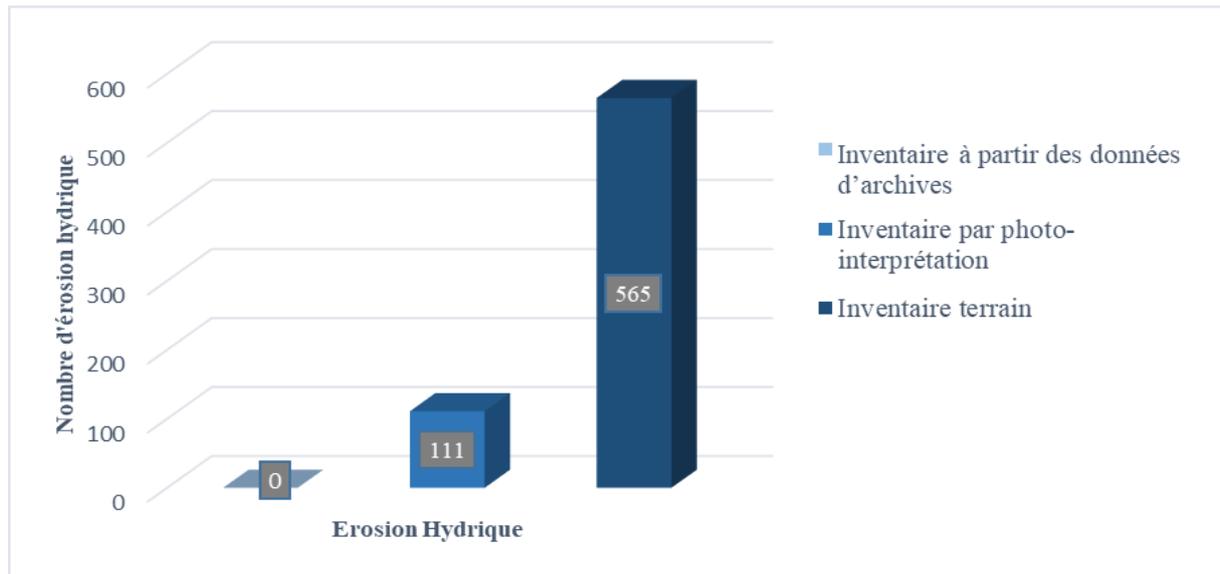


Fig.40. Histogramme comparatif du nombre d'érosion hydrique identifiés par photo-interprétation, données d'archives et sur le terrain

3.3. Les facteurs de prédisposition à l'occurrence de l'érosion hydrique

Pour évaluer la susceptibilité de l'érosion en ravines dans cette étude, il est nécessaire de considérer plusieurs facteurs efficaces pour l'érosion en ravines. 11 facteurs de prédispositions efficaces ont été sélectionnés, sur la base des données et des informations disponibles et obtenues pour cette zone, notamment l'altitude, le degré de pente, l'exposition des versants, la courbure du plan, la courbure du profil, la proximité aux routes, la proximité aux failles, la proximité aux réseaux hydrologiques, L'indice d'humidité topographique (TWI), indice de végétation par différence normalisée (NDVI), la lithologie. Ces facteurs jouent un rôle important dans l'apparition de l'érosion en ravines dans la zone d'étude (Fig. 39).

Le choix des facteurs de susceptibilité est une étape essentielle dans la cartographie de la susceptibilité à l'érosion hydrique. A cet égard on a créé une base de données en utilisant l'ArcGIS 10.4 pour obtenir un total de 11 cartes.

a) Carte d'altitude (élévation)

L'élévation est un facteur important et a un effet significatif sur l'érosion en ravines (Amare *et al.*, 2021), ainsi qu'un impact clair sur la qualité de la couverture végétale et les caractéristiques des précipitations. À cet égard, nous avons préparé une carte d'élévation à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT ASTER) avec une résolution de 30 * 30 m, qui a été téléchargée à partir d'Earth Explorer, et les élévations vont de 478 m à 1865 m dans le périmètre de la zone d'étude. La carte d'élévation a été subdivisée en six catégories (Fig. 41) :

- i. < 500 ;
- ii. 500-800 ;
- iii. 800-1100 ;
- iv. 1100-1400 ;
- v. 1400-1700 ;
- vi. >1700 m.

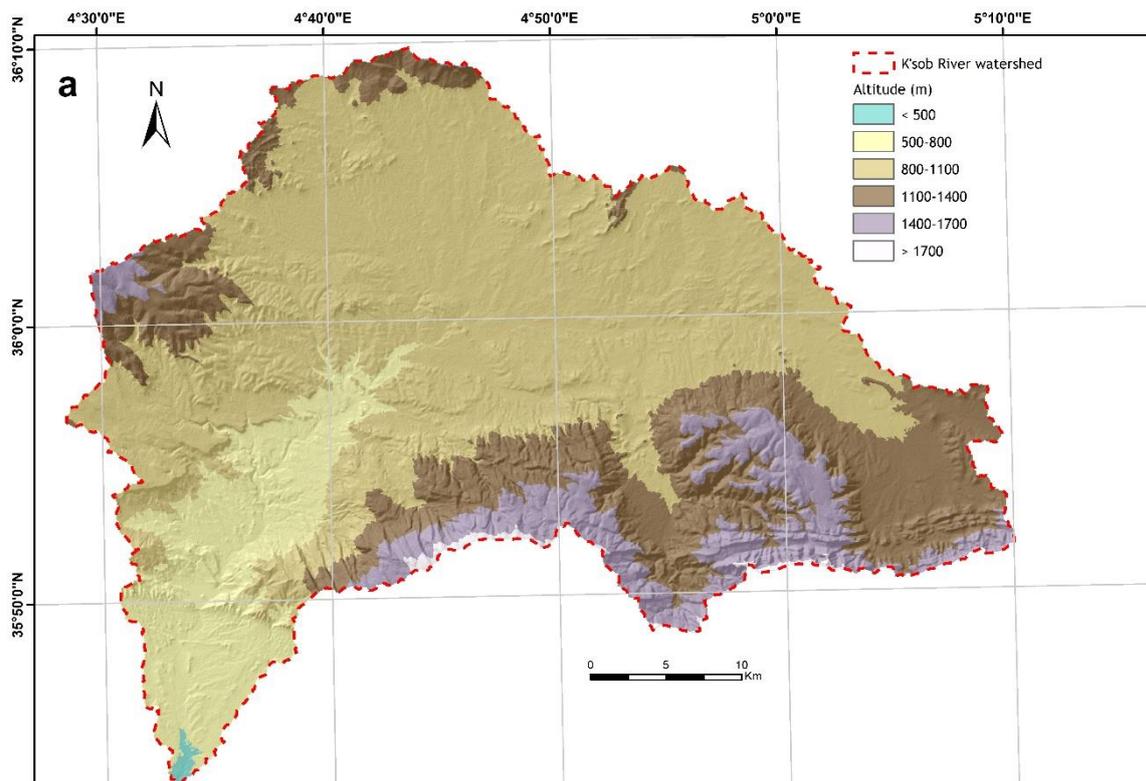


Fig.41. Carte d'élévation de Bassin Versant du K'sob.

Il ressort de cette carte que la zone d'étude est entourée d'un ensemble de montagnes du Sud-Est au Nord-Ouest, et qu'au milieu de la carte se trouvent des zones de hauteur moyenne à basse, coupées par la vallée de K'sob.

Cela augmente l'intensité de l'érosion hydrique chaque fois qu'il pleut abondamment, en raison de la diminution de la couverture végétale dans la région.

b) Carte d'exposition des versants

La carte d'exposition des versants est considérée comme un facteur important dans l'érosion en ravines. Les valeurs d'aspect indiquent les directions des pentes physiques, mesurées dans le sens horaire en degrés de 0 à 360 (*Amare et al., 2021; Patton & Schumm, 1975; Poiraud, 2014; Wang et al., 2011*).

L'exposition des versants peut indirectement influencer les processus d'érosion car il contrôle la durée d'exposition au soleil, l'évapotranspiration, la rétention d'humidité, le type de couverture végétale et la répartition de la végétation sur les pentes (*Umar et al., 2014*).

La carte d'exposition des versants est extraite à l'aide du modèle numérique d'élévation (ASTER MNT) avec une taille de cellule de grille de 30 * 30 mètres.

La carte d'exposition des versants contient neuf classes (*Fig. 42*) :

- i. plat (-1°) ;
- ii. Nord ($0-22,5^{\circ}$) ;
- iii. Nord-Est ($22,5-67,5^{\circ}$) ;
- iv. Est ($67,5-112,5^{\circ}$) ;
- v. Sud-Est ($112,5-157,5^{\circ}$) ;
- vi. Sud ($157,5-202,5^{\circ}$) ;
- vii. Sud-Ouest ($202,5-247,5^{\circ}$) ;
- viii. Ouest ($247,5-292,5^{\circ}$) ;
- ix. Nord-Ouest ($292,5-337,5^{\circ}$).

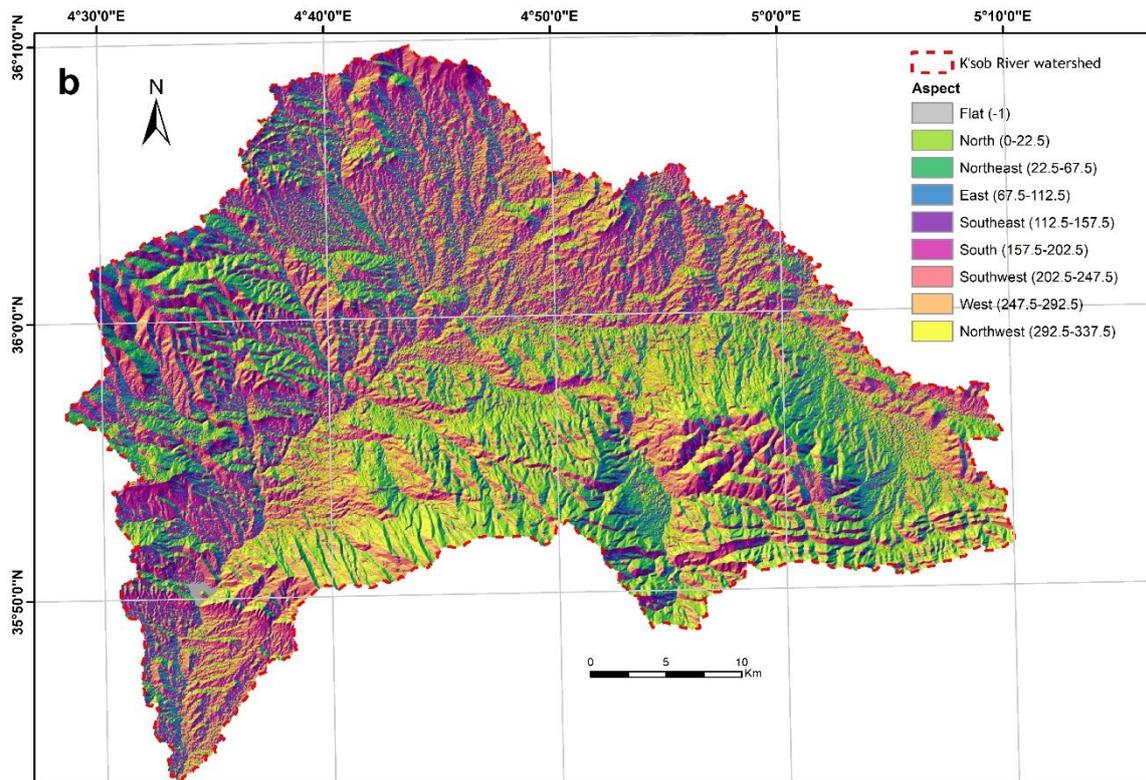


Fig.42. Carte d'exposition des versants de Bassin Versant du K'sob.

L'analyse de la Fig. 42 nous a permis de constater que les zones d'érosion hydrique sont localisées principalement sur les versants orientés vers le Nord-Est et Nord, suivis par les versants orientés vers le Sud-Ouest et Sud (qui constituent la classe la plus influente). Ces quatre orientations présentent des densités et superficies supérieures comparativement aux autres.

c) Carte des pentes

Le degré de pente augmente la vitesse des précipitations et l'intensité de l'érosion des sols et la formation de l'érosion en ravines (Amare et al., 2021; Tamene & Vlek, 2007). Dans cette étude, le facteur de degré de pente à partir (ASTER MNT) a été produit avec une précision de 30 m, la carte de degré de pente a été dérivée à l'aide de la fonction "Pente" des outils Spatial Analyst de MNT. Les gradients minimum et maximum dans la zone d'étude de zéro à 50,78 degrés respectivement.

Cette carte a été divisée en 5 classes dont les valeurs sont les suivantes (Fig. 43) :

- i. < 10° très faible ;
- ii. 10-20° faible ;
- iii. 20-30° modérée ;

- iv. 30-40° forte ;
- v. > 50° très forte.

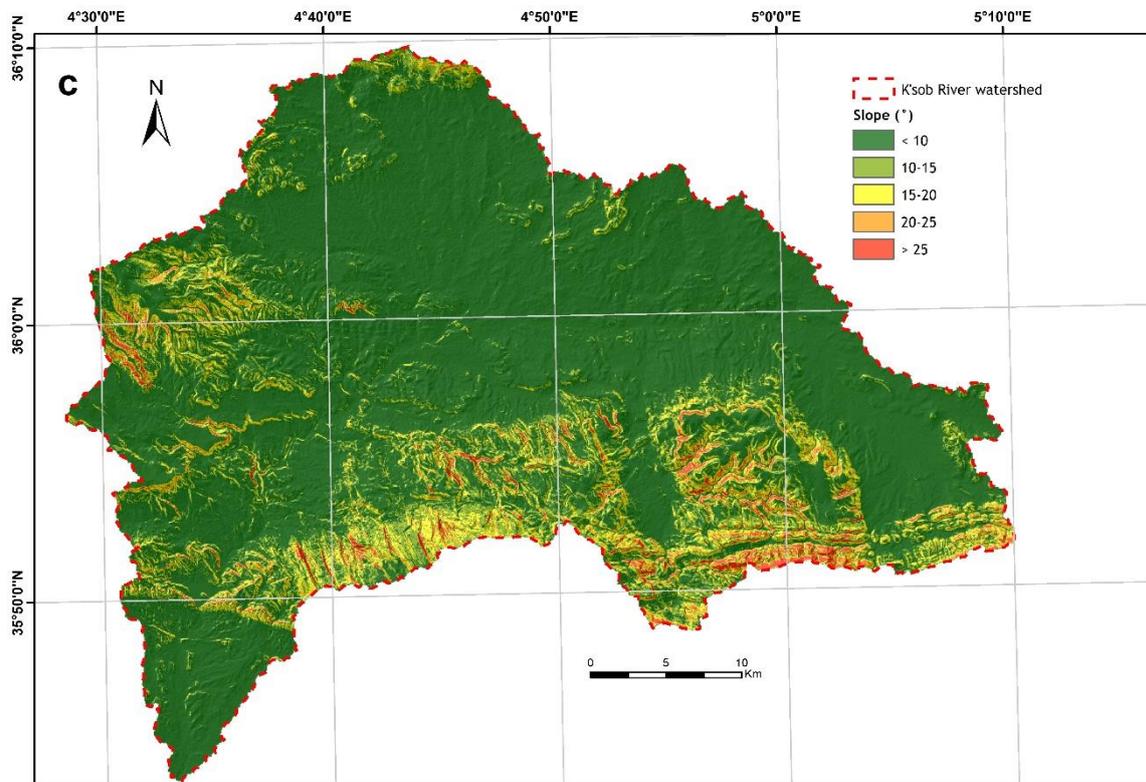


Fig.43. Carte de pentes de Bassin Versant du K'sob.

On note que les pentes sont largement situées au Sud-Est et au Sud-Ouest de la carte ainsi qu'au Nord-Ouest. Ils sont également concentrés dans les zones de traversée de l'Oued K'sob, et plus la pente est forte, plus l'eau s'écoule et l'érosion s'accroît avec l'apparition de l'érosion en ravines plus ou moins profondes.

d) Carte de courbure du plan

La courbure plane peut être définie comme le contour d'une ligne de contour hypothétique qui traverse une cellule spécifique (Amare et al., 2021; Conforti et al., 2011; Pham et al., 2020). Elle est utilisée pour distinguer les crêtes et les vallées. La carte de courbure a été créée du MNT dans l'Arc Map 10.4 avec une taille de cellule de grille de 30 * 30 mètres, la valeur la plus élevée et la plus basse sont respectivement 2,44771 et -3,11316 (Fig. 44).

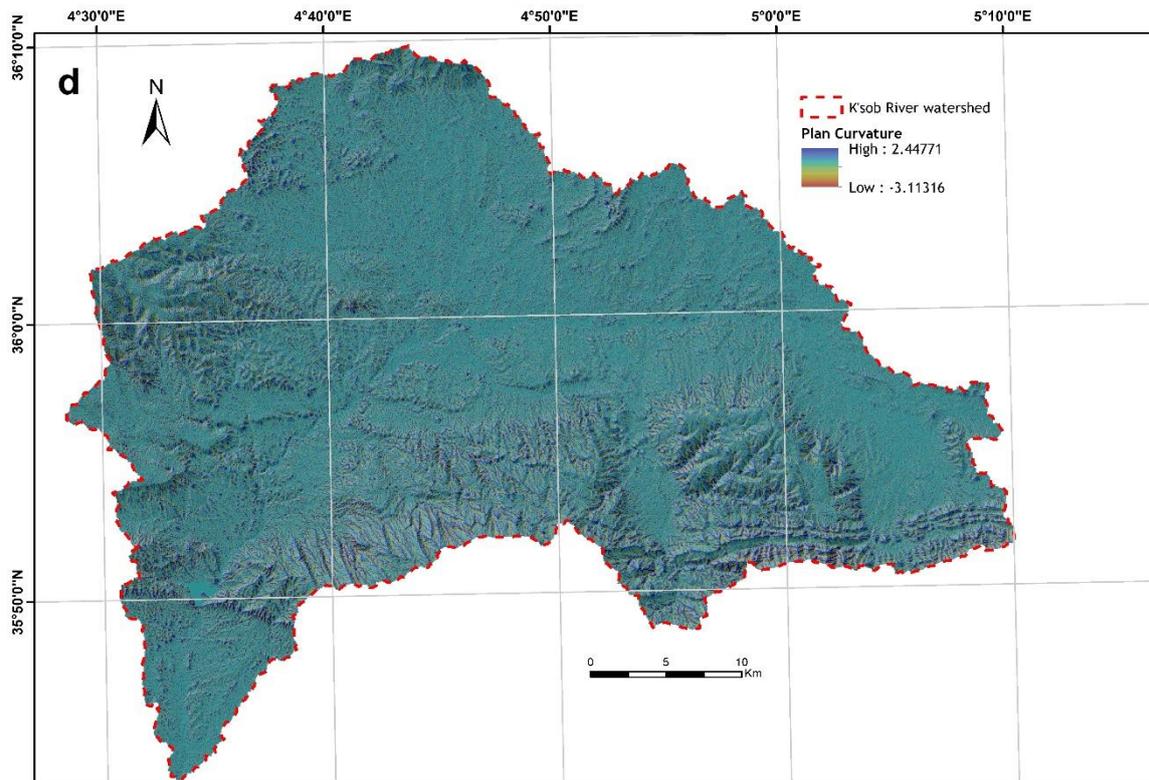


Fig.44. Carte de courbure du plan de Bassin Versant du K'sob.

Dans cette étude, la carte de courbure du plan a montré que la zone se composait de trois parties : plate, convexe et concave. La courbure du terrain affecte l'écoulement descendant et provoque la convergence/divergence des flux d'eau sur les pentes.

e) Carte de courbure du profile

La courbure du profile est la courbure de la surface dans la direction de la plus forte pente. Ce facteur peut avoir des valeurs négatives et positives. La courbure du profile affecte l'écoulement d'eau drainant la surface et influence l'érosion (Amare et al., 2021; Conforti et al., 2011; Pham et al., 2020).

La carte de la courbure du profile a été préparée à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT ASTER) avec une résolution de 30 * 30 m, et les valeurs de ce paramètre étaient respectivement de 3,41013 et - 4,81285 (Fig. 45).

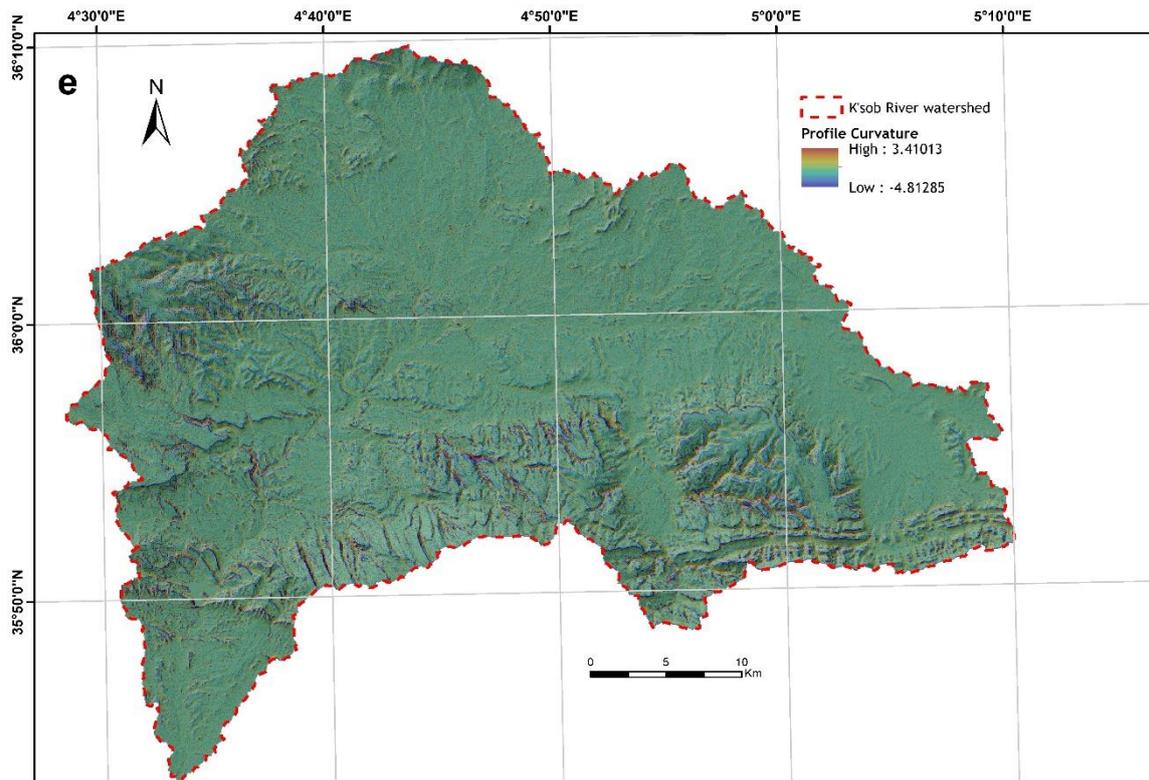


Fig.45. Carte de courbure du profil de Bassin Versant du K'sob.

f) Carte de proximité aux routes

Un facteur artificiel a un effet remarquable sur l'érosion en ravines. Ce facteur, causé par les activités humaines, entraîne une instabilité accrue des pentes et un potentiel d'érosion en ravines (Du et al., 2017).

Les routes représentent des zones imperméables qui affectent les opérations de drainage en concentrant le ruissellement de surface et en modifiant les fonctions hydrologiques des pentes des collines. Ces répercussions augmentent considérablement le débit de surface et permettent un ruissellement plus rapide des pluies, ce qui érode certainement les zones dénudées et provoque de l'érosion en ravines.

La carte de proximité routière est réalisée par numérisation d'images Google Earth. Le résultat de cette numérisation est ensuite transformé en distances euclidiennes par le logiciel ArcGIS10.4.

La Fig. 46 montre la carte de la proximité routière, subdivisée en 08 zones tampons :

- i. < 1000 m ;
- ii. 1000-2000 m ;
- iii. 2000-3000 m ;
- iv. 3000-4000 m ;
- v. 4000-5000 m ;
- vi. 5000-6000 m ;
- vii. 6000-7000 m ;
- viii. ≥ 7000 m.

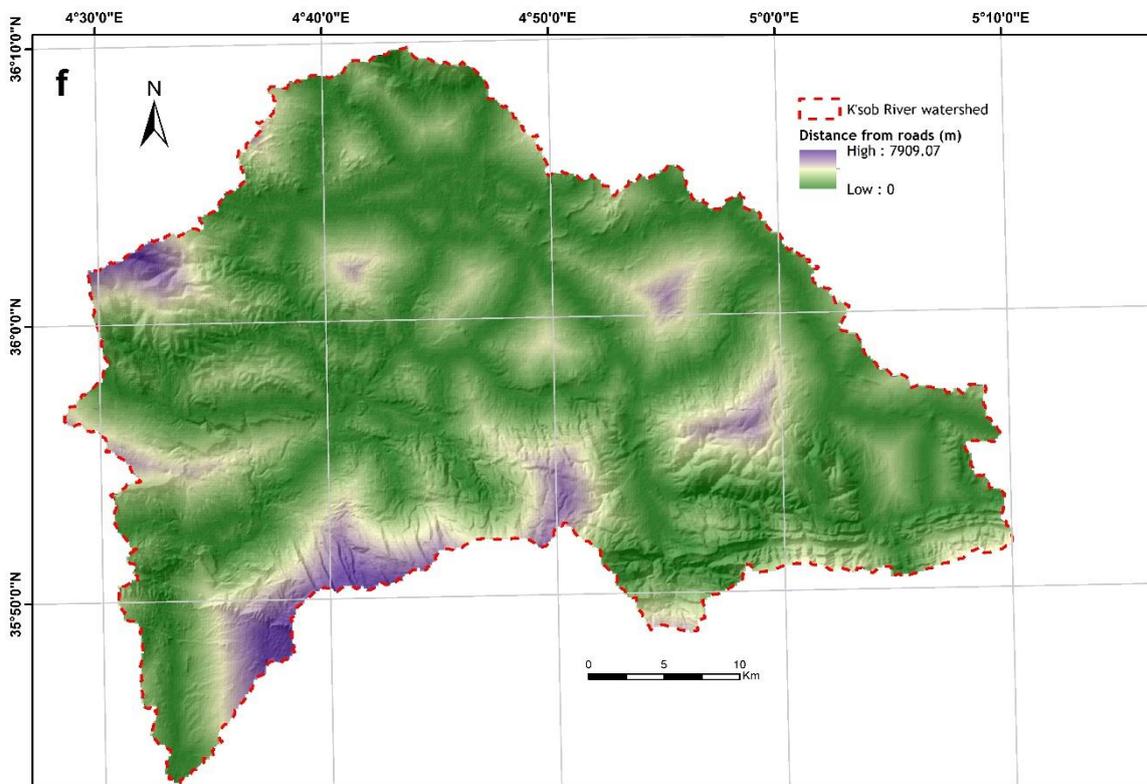


Fig.46. Carte de proximité aux routes de Bassin Versant du K'sob

g) Carte de proximité aux failles

Les failles sont un facteur lithologique important dans l'érosion en ravines, plus elles sont abondantes, plus leur effet est important (Gayen et al., 2019; Naghibi et al., 2016). La (Fig. 47) présente une carte de proximité aux failles, cette carte a été réalisée en numérisant les cartes géologiques ; Bordj-Bou-Argeridj, Ain-Taghrout, Maâdid, Ras-El-Oued et M'sila à l'échelle 1/50 000 (Institut Géographique national, Algérie).

Les résultats obtenus des distances euclidiennes ont été répartis en six (08) classes :

- i. < 2000 m ;
- ii. 2000-4000 m ;
- iii. 4000-6000 m ;
- iv. 6000-8000 m ;
- v. 8000-10000 m ;
- vi. 10000-12000 m ;
- vii. 12000-14000 m ;
- viii. ≥ 14000 m.

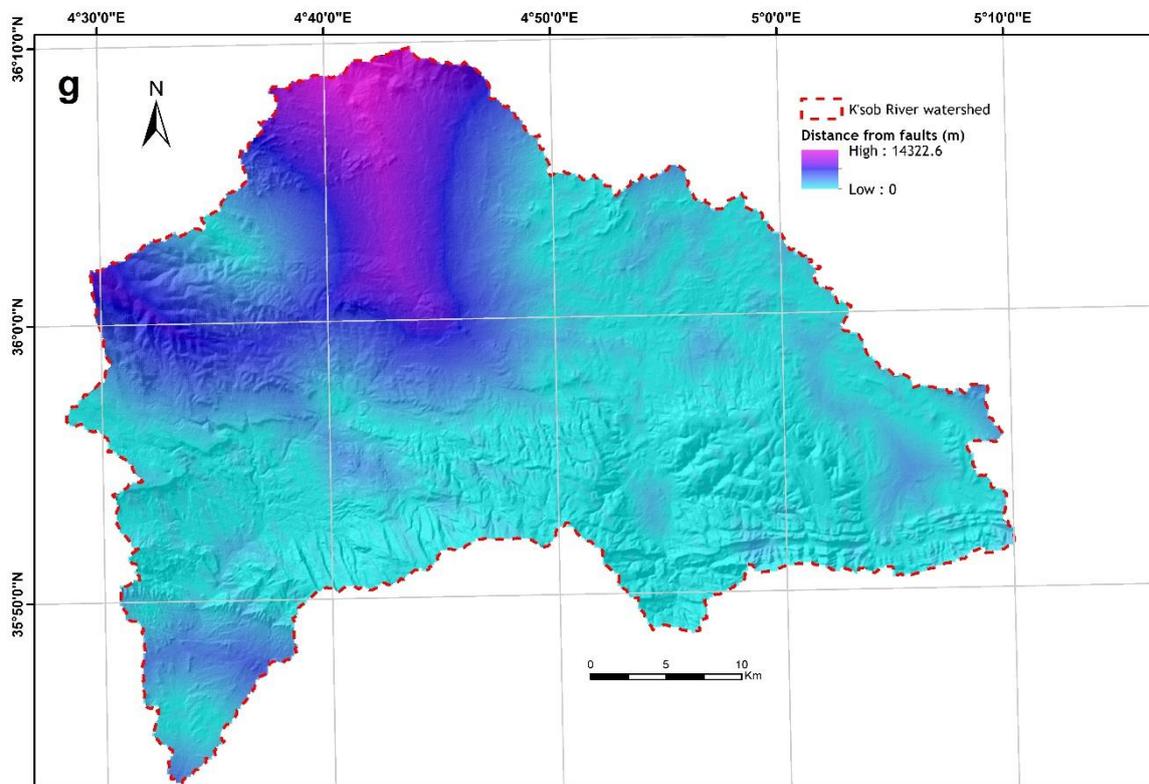


Fig.47. Carte de proximité aux failles de Bassin Versant du K'sob.

Le bassin versant du K'sob est caractérisée par des reliefs très accidentés. Les failles sont présentes dans presque toute la région, avec une concentration marquée dans les parties centrale, Sud-Ouest et Nord de la zone d'étude.

h) Carte de proximité aux réseaux hydrographiques

La proximité du réseau hydrographique joue un rôle important dans l'érosion en ravines qui sont fondamentalement liées au réseau de drainage (Choi et al., 2008; Du et al., 2017). La carte du réseau hydrologique est directement dérivée du modèle numérique de terrain de la zone d'étude avec une résolution de 30x30 m.

La carte de proximité des réseaux hydrologiques est ensuite obtenue en appliquant la distance euclidienne.

Six zones tampons différentes ont été créées dans la zone d'étude pour déterminer l'impact du cours d'eau sur l'érosion en ravines (Fig. 48) :

- i. < 400 m ;
- ii. 400-800 m ;
- iii. 800-1200 m ;
- iv. 1200-1600 m ;
- v. 1600-2000 m ;
- vi. ≥ 2000 m.

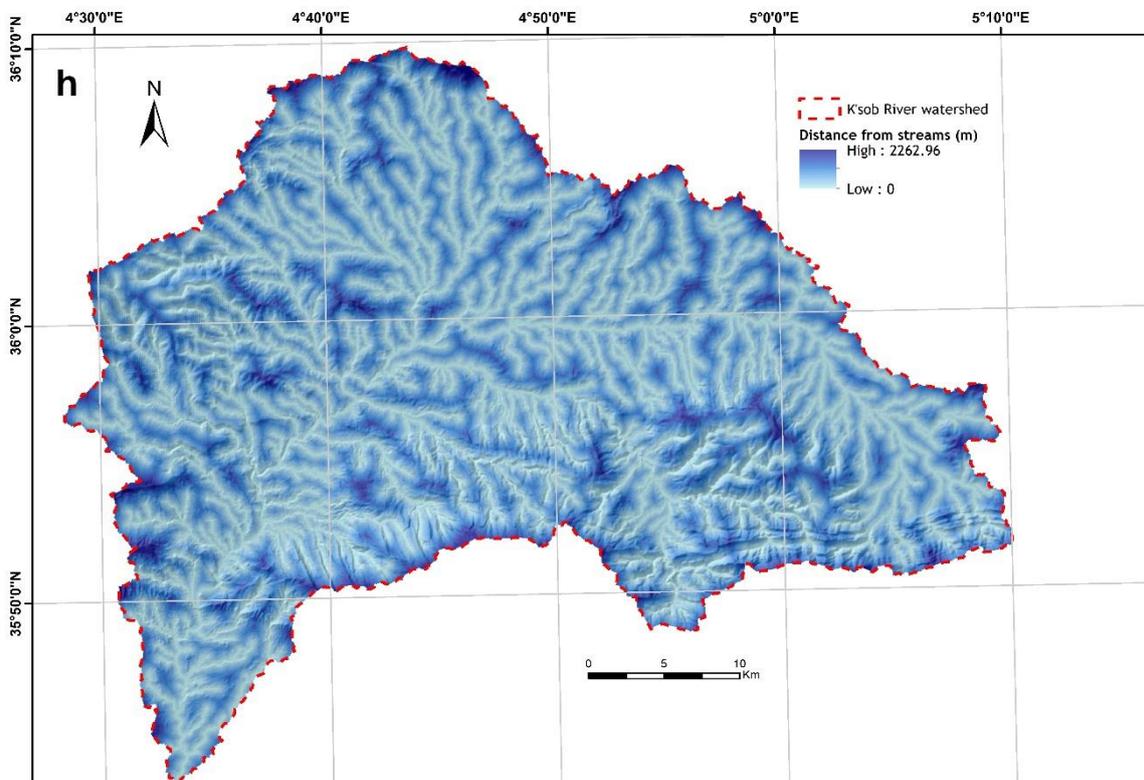


Fig.48. Carte de proximité aux réseaux hydrographiques de Bassin Versant du K'sob.

i) Carte d'indice d'humidité topographique (TWI= Topographic Wetness Index)

TWI a été utilisé pour étudier les effets de l'échelle spatiale sur les processus hydrologiques et pour définir les voies d'écoulement hydrologique (Amare et al., 2021; Gómez-Gutiérrez et al., 2015; Moore et al., 1991; Qin et al., 2011). L'indice d'humidité topographique est défini comme :

$$TWI = \ln\left(\frac{As}{\tan\beta}\right)$$

Où, As est le bassin versant spécifique et β est le gradient de pente en degrés.

Les valeurs de TWI dans le bassin versant du K'sob ont un maximum de 24,6673 et un minimum de 3,19794 (Fig. 49).

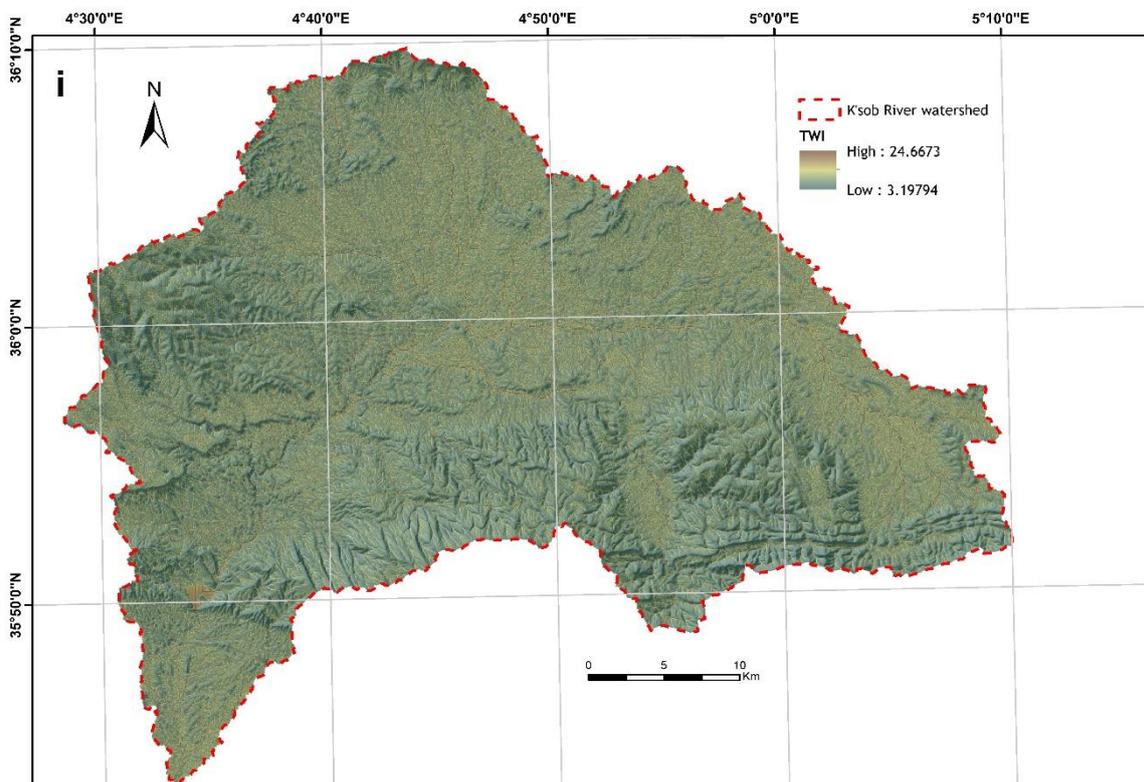


Fig.49. Carte d' L'indice d'humidité topographique de Bassin Versant du K'sob.

j) Carte d'indice de végétation par différence normalisée (NDVI = Normalized Difference Vegetation Index)

Ce facteur a été utilisé pour fournir une estimation quantitative de la relation entre l'érosion en ravines et la densité de la végétation (*Gyssels et al., 2005*).

Le NDVI a été calculé à l'aide de l'équation :

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

Où *NIR* et *R* sont respectivement les bandes proches infrarouges et rouges du spectre électromagnétique.

NDVI a été calculé en utilisant les bandes rouges et proches infrarouges du LANDSAT 8 OLI/TIRS LC08_L1TP_195035_20200827_20200905_02_T1 (daté du 5 septembre 2020). Ses valeurs variaient entre -0,115401 et 0,594032 respectivement (*Fig. 50*). Dans ce type d'étude, il serait préférable d'utiliser plusieurs images proches des dates d'observation de l'érosion en ravines pour calculer le NDVI moyen, mais cela n'a malheureusement pas été fait en raison de l'indisponibilité de ces images.

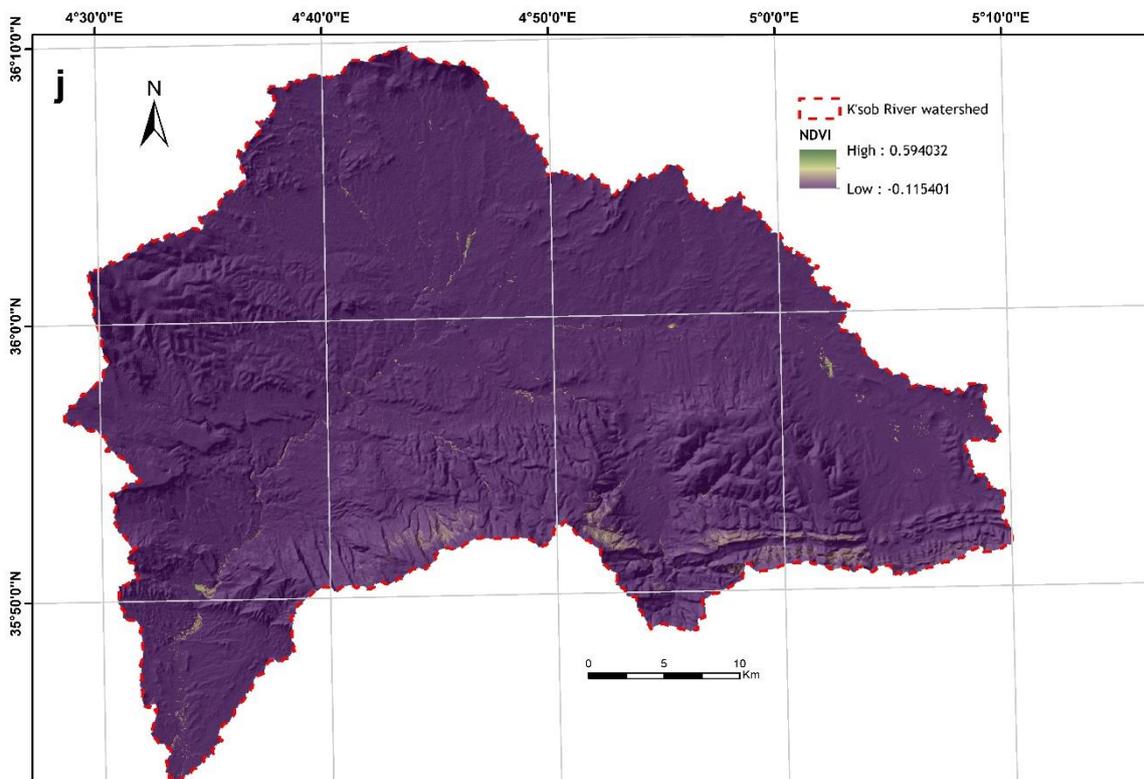


Fig.50. Carte d'indice de végétation par différence normalisée de Bassin Versant du K'sob.

k) Carte de la lithologie :

Les formations géologiques jouent un rôle important dans le taux de l'érosion en ravines (Du et al., 2017). De plus, l'érosion en ravines dépend particulièrement des propriétés lithologiques des matériaux exposés ou proches de la surface de la terre (Golestani et al., 2014; Rahmati et al., 2016).

Les unités lithologiques ont été extraites de les cartes géologiques au 1/50 000e de Bordj-Bou-Arredj, Ain-Taghrout, Ras-El-Oued, Maâdid et M'sila. L'âge des composantes géologiques de la zone d'étude varie respectivement du Quaternaire actuel à l'ère du Trias ancien, comme le montrent (Tab. 17) et la (Fig. 51) :

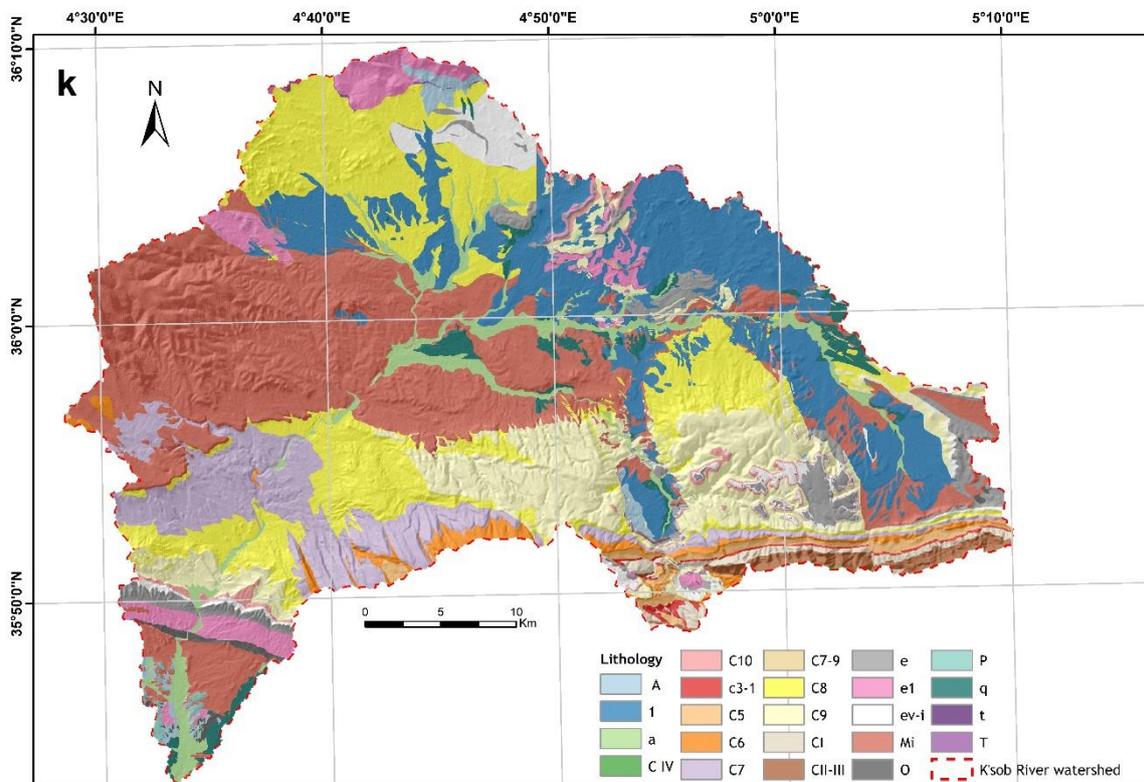


Fig.51. Carte de La lithologie de Bassin Versant du K'sob.

Note :

Afin de garantir une communication efficace, les couleurs ont été soigneusement sélectionnées pour leur caractère classique. Il convient de noter que ces couleurs ne suivent pas les normes internationales des cartes géologiques. Le choix a été fait pour éviter tout risque de confusion dans l'interprétation de la carte, et pour faciliter une meilleure lecture de celle-ci.

Tab.17. Lithologie de la zone d'étude

Code	Lithologie	Age géologique
Q.a.A.q	Q. les dépôts alluviaux anciens dans les vallées	Quaternaire
	a. alluvions récentes	
	A. alluvions et éboulis anciens et récents	
	q. alluvions anciennes du plateau	
T	Roche calcaire sédimentaire	Travertin
P	terrasses de graviers et conglomérats	Pliocène
Mi	argiles sableuses, grès grossier, conglomérats, marne à pain jaune, marne gréseuse, grès fossilifère, conglomérats et argiles rouges continentales	Miocène
O	grès et argiles rouges continentaux et marnes blanches et bancs de grès rouges	Oligocène
e ₁	argiles huîtres à lumachelle, gypse et argiles blanches, calcaires marneux à Thersite	Lutétien supérieur
e	calcaires et marnes gris clair, calcaires noirâtres à silex noir	Lutétien inférieur
ev-I	calcaires à silex et calcaires phosphatés	Yprésien – Thanétien
C ₁₀	marnes argileuses à intercalations calcaires à Cardita beaumonti	Danomontien
C ₉	Calcaires Orbitoides media, calcaires microbréchoïdes, calcaires marneux et marnes grises	Maestrichtien
C ₈	marnes grises, marnes calcaires et lumachelles d'Ostraceae	Campanien
C ₇₋₉	marnes, calcaires, lumachelles et zones calcaires à Inocerames	Sénonien
C ₆	calcaire et dolomie litée	Turonien
C ₅	marnes à Mantelliceras Oursins et huîtres	Cénomanién
C ₇	calcaires zoogéniques, calcaires marneux, dolomies, lumachelles des Ostracées	Emscherien
C ₃₋₁	calcaires glauconeux, marnocalcaires nodulaires, calcaires zoogéniques et marnes gris foncé	Albien
C _I	calcaires oolithiques, calcaires à orbitolines et rudistes, grès, dolomies et marnes	Aptien supérieur
C _{II-III}	dolomies, calcaires, marnes, grès et argiles	Aptien inférieur-Barrémien
C _{IV}	calcaire gris, calcaire et marne, grès et marne gréseuse	Hauterivién
t	Oophito-gypse, gypse veineux, ophite	Trias

Source des données : Cartes géologiques de (i) Bordj-Bou-Arreridj, (ii) Ain-Taghrout, (iii) Ras-El-Oued (iv) Maâdid, et (v) M'sila.

4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons expliqué comment préparer une carte d'inventaire grâce à des visites sur le terrain, ainsi que le traitement des images satellites au bureau.

Ensuite, nous avons préparé 11 cartes en utilisant ArcGIS 10.4, dont chacune de ces cartes représente un facteur prédisposition obtenu, qui a un impact direct sur la survenue de l'érosion hydrique.

Dans notre étude, ces facteurs étaient : l'élévation, la pente, l'exposition des versants, la courbure du plan, la courbure du profil, la proximité aux routes, la proximité aux failles, la proximité aux réseaux hydrographiques, L'indice d'humidité topographique (TWI), indice de végétation par différence normalisée (NDVI), la lithologie. Tous ces facteurs jouent un rôle majeur dans la création d'une carte finale de la susceptibilité.

Les différentes méthodes de cartographie de l'érosion hydrique utilisées pour produire les modèles finaux dans la zone d'étude sont présentées dans le chapitre 4.

Chapitre 04

Modélisation, Résultats et Discussions

1. Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons discuté en détail des facteurs de prédisposition sur lesquels notre étude s'appuyait. À partir de ces derniers, nous avons pu obtenir, dans ce dernier chapitre, trois cartes différentes liées à la susceptibilité à l'érosion en ravines, en utilisant trois méthodes d'apprentissage automatique différentes : forêt aléatoire (RF), boosting de gradient extrême (XGBoost) et régression logistique (LR).

Ces cartes obtenues dépendent directement de la qualité et de l'efficacité des données utilisées pour obtenir des résultats satisfaisants et approximatifs. Grâce à ces cartes, vous pouvez identifier les zones les plus susceptibles à l'érosion hydrique et le degré de variation, et vous pouvez connaître la méthode d'apprentissage automatique la plus efficace.

Le but principal de cette dernière section est de produire trois cartes indiquant la susceptibilité de l'érosion hydrique dans la zone d'étude. Ces cartes peuvent être utiles pour comprendre le phénomène d'érosion en ravines dans la région et pour prendre des mesures pour le prévenir ou le réduire.

2. Test de multi-colinéarité

La Multi-colinéarité est définie comme une corrélation entre deux ou plusieurs variables indépendantes dans un ensemble de données. Cette méthode statistique linéaire est adoptée pour reconnaître le pouvoir de prédiction de la susceptibilité des prédicteurs de l'érosion en ravines et utilisée de nombreuses méthodes différentes (*Pham et al., 2020*). La colinéarité entre les facteurs de prédisposition diminue la précision de la prédiction du modèle. Ainsi, pour les modèles qui indiquent un signe de colinéarité, il est nécessaire de les exclure avant le début du GESM.

Il existe deux indices de multi-colinéarité des variables, le facteur de tolérance (TOL) et le facteur d'inflation de la variance (VIF). La tolérance est la réciproque du VIF (*Arabameri et al., 2019b*). Cette dernière a l'aptitude de déterminer des données supplémentaires, de diminuer les erreurs standard et de fournir un bon résultat par rapport aux méthodes traditionnelles. Le $VIF > 5$ signifie une forte multi-colinéarité entre les facteurs de conditionnement, tandis que le $TOL > 0,1$ indique une faible multi-colinéarité. Une valeur TOL inférieure à 0,1 ou une valeur VIF supérieure à 10 indique une multi-colinéarité grave (*Achour et al., 2018*). Le (Tab. 18) présente les deux indices (tolérance et VIF) relatifs à notre étude.

3. Modélisation de la susceptibilité à l'érosion en ravines dans la zone d'étude

Les procédures de travail ont consisté en une collecte de données sur le terrain et une analyse des données (Fig. 52).

La méthodologie appliquée pour la cartographie de la susceptibilité de l'érosion hydrique dans la zone étudiée est présentée dans la Fig. 52.

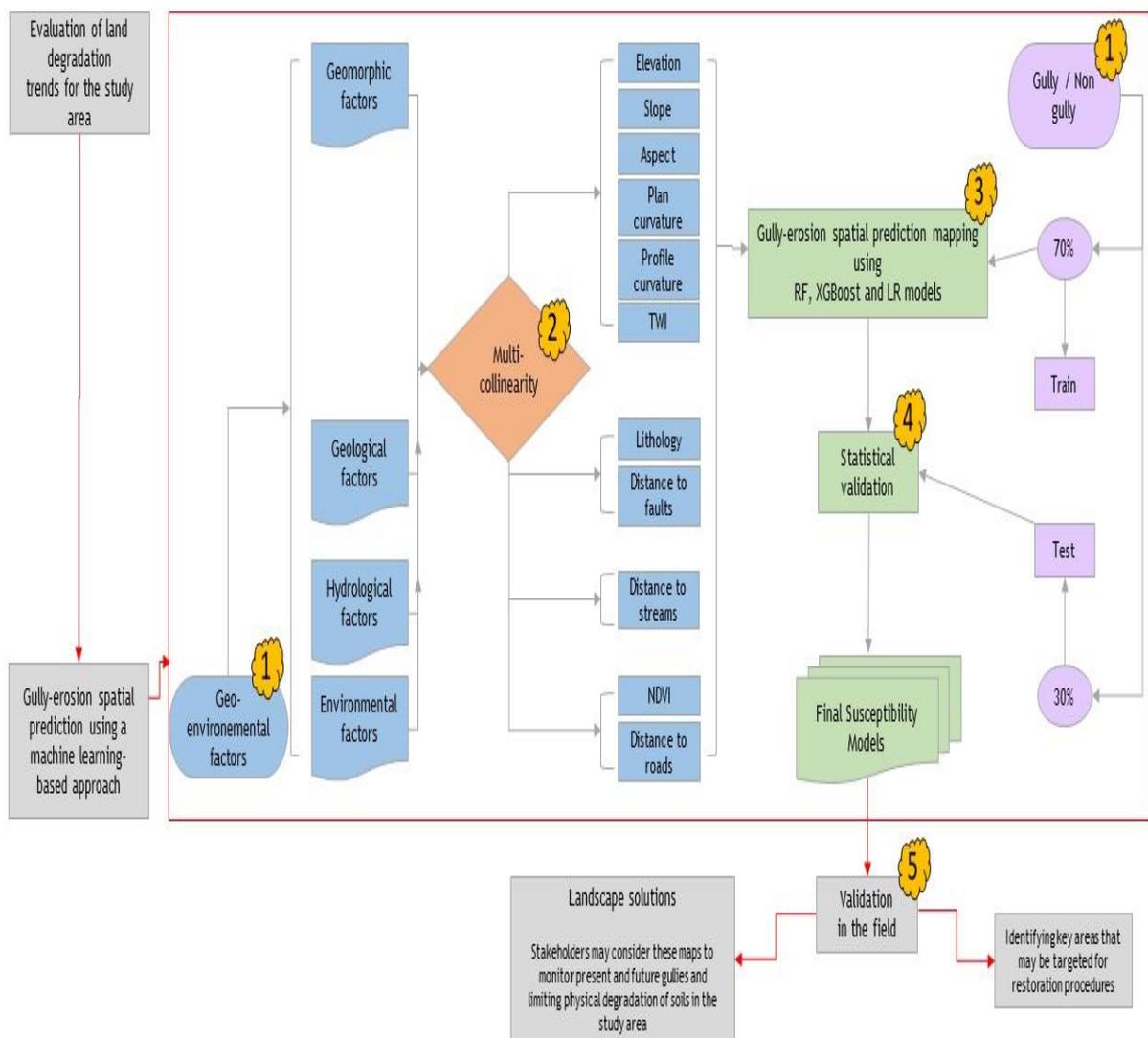


Fig.52. Organigramme de l'étude.

3.1. La méthode de forêt aléatoire (RF = Random Forest)

La forêt aléatoire est une méthode moderne basée sur les arbres qui comprend plusieurs arbres de classification et de régression (Loh, 2011). Il s'agit d'un classificateur combiné dans un algorithme d'apprentissage automatique ou même d'un algorithme basé sur un arbre (Chen & Liu, 2005). RF repose sur le processus consistant à n'ajuster aucun arbre de décision sur différents sous-échantillons, puis à retirer la moyenne pour augmenter les performances du modèle. Cette méthode est appelée forêt aléatoire (Amare et al., 2021; Arabameri et al., 2020; Arabameri et al., 2019a; Avand et al., 2019; Pham et al., 2020; Saha et al., 2020).

Il s'agit également d'une méthode non paramétrique pour la modélisation de données continues et discrètes des méthodes d'arbre de décision (Yang et al., 2021). Le RF est utilisé au cours de la dernière décennie pour prédire l'importance variable dans divers domaines d'étude, y compris la susceptibilité aux glissements de terrain (Achour & Pourghasemi, 2020; Merghadi et al., 2018), la susceptibilité aux incendies de forêt (Milanović et al., 2020) et la pollution des eaux souterraines (He et al., 2022). Il est connu comme un algorithme très performant pour prédire l'érosion en ravines par rapport à d'autres algorithmes (Wang et al., 2021).

Toutefois, le principal problème rencontré par cette méthode est la fluctuation des résultats de chaque arbre (Arabameri et al., 2018a). Pour réduire ces fluctuations et sous-estimer la variance, une approche de forêt aléatoire a été proposée, qui est efficace pour la prédiction et l'explication des données en ce qui concerne l'érosion en ravines (Pham et al., 2020).

L'algorithme de forêt aléatoire proposé par Breiman (Breiman, 2001). Pour utiliser cette forme, l'utilisateur doit faire le nombre d'arbres (T) et le nombre de facteurs (m) (Pourghasemi & Rahmati, 2018). Le résultat de ce processus avec des arbres $\{T_b\}$ B1 pour le nouveau point x est le suivant (Pham et al., 2020) :

$$\text{Régression: } f_{rf}^b(x) = \frac{1}{b} \sum_{b=1}^b T_b(x)$$

Classification : Soit $C^b(x)$ la prédiction de classe pour les deux arbres de forêts aléatoires. Alors, $C^{AB}_{rf}(x) = \text{vote maximum } \{C^b(x)\}^{B1}$ (Friedman et al., 2000; Naghibi et al., 2016).

Le pourcentage d'erreurs de classification sur tous les facteurs hors sac est appelé l'erreur hors sac (OOB) (Achour & Pourghasemi, 2020).

Dans cette étude, le RF a été exécuté dans le logiciel statistique R® version 3.6.3 en utilisant le package « ranger » (Wright & Ziegler, 2015).

3.2. La méthode de le boosting de gradient extrême (Extreme Gradient Boosting = XGBoost)

Basée sur la théorie du gradient boosting machine (GBM) (Friedman, 2002), cette méthode est communément connue sous le nom d'arbre de décision puissant.

L'Algorithme Extreme Gradient Boosting (XGBoost) est une méthode d'ensemble qui fonctionne en boostant les arbres (Arabameri et al., 2021; Chakraborty et al., 2019; Chen et al., 2021). Il utilise le concept de boosting présenté par Chen et Guestrin (Chen & Guestrin, 2016). Cette méthode Il contribue à la construction d'un modèle de prédiction sous la forme d'un ensemble boosté d'arbres de classification faibles par une descente de gradient qui optimise la fonction de perte (Yang et al., 2021). Il est plus efficace et peut être utilisé à la fois pour la classification et la régression. Il ajoute de nombreux modèles d'arbre de décision pour produire une classification, avec une plus grande précision, basée sur le processus d'itération.

Le modèle XGBoost créé en améliorant la fonctionnalité cible suivante (Arabameri et al., 2021) :

$$OF(\theta) = \sum_{i=1}^n l(y_i, \bar{y}_i) + \sum_{k=1}^k \Omega(f_k)$$

Où, $\sum_{i=1}^n l(y_i, \bar{y}_i)$ représente la fonction de perte de l'erreur quadratique moyenne utilisée pour ajuster le modèle sur les données d'apprentissage. $\sum_{k=1}^k \Omega(f_k)$ désigne le terme de régularisation qui permet d'éviter le surajustement. K désigne le nombre d'arbres individuels. f_k est un arbre dans l'ensemble. y_i et \bar{y}_i sont respectivement une sortie de classe réelle et prédite.

Dans cette étude, la version 3.6.3 du logiciel R a été utilisée pour stratifier l'erreur quadratique moyenne (RMSE) XGBoost. La RMSE a été calculée selon l'équation suivante (Ding et al., 2020) :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$$

Où n est le nombre total de points de données.

y_i Correspond aux données mesurées, \hat{y}_i aux données prédites.

Les paramètres XGBoost suivants ont été vérifiés et améliorés : le nombre d'itérations (m), le taux d'apprentissage (η), la profondeur maximale de l'arbre (h), la réduction minimale des pertes (γ), la somme minimale du poids de l'instance (ζ), le pourcentage de sous-échantillon (μ) et le rapport de sous-échantillon des colonnes (δ) (Tab. 20).

3.3. La méthode de la régression logistique (Logistic Regression = LR)

La régression logistique est une analyse de régression efficace pour les variables dépendantes dichotomiques (binaires). Elle représente un type spécifique de modèle linéaire généralisé. La régression logistique est particulièrement adaptée à une analyse prédictive de l'existence ou de l'absence de l'érosion en ravines. La régression logistique (LR) est la méthode la plus couramment utilisée pour étudier la susceptibilité à l'érosion en ravines (Adition et al., 2018). Elle permet également aux géomorphologues d'identifier les facteurs environnementaux responsables du potentiel de l'érosion en ravines et de mettre en œuvre des stratégies pour atténuer ce phénomène (Arabameri et al., 2018b). La relation entre l'occurrence de l'érosion en ravines et leur dépendance vis-à-vis des prédicteurs se traduit dans l'équation suivante :

$$P = \frac{1}{1+e^{-z}}$$

Où P représente le potentiel d'occurrence de l'érosion en ravines, noté de 0 à 1. Z désigne les paramètres de conditionnement de l'érosion en ravines érosives et est considéré comme une relation linéaire des facteurs de conditionnement, X_i ($i = 1, 2, \dots, n$) qui sont représentés comme suit :

$$Z = \text{Logit}(P) = \ln \frac{P}{1-P} = C_0 + C_1 X_1 + \dots + C_n X_n$$

Où C_0 est le coefficient constant de la méthode et $X_1, X_2 \dots X_n$ sont respectivement les coefficients des variables indépendantes C_1, C_2, C_n .

3.4. Validation des modèles

La courbe ROC est utilisé pour mesurer la précision de prédiction des trois modèles LR, RF et XGBoost. Dans cette étude, 30% de l'érosion en ravines ont été utilisées pour valider les modèles basés sur le calcul de l'aire sous la courbe (AUC). La valeur AUC est comprise entre 0 et 1. Plus elle est proche de 1, meilleure est la précision du modèle. Nous avons utilisé l'aire sous la courbe (AUC) comme principal indice statistique sur la courbe ROC.

Dans le cadre de cette étude, la sensibilité (*Sensitivity*) désigne le rapport des vrais positifs à toutes les classes d'érosion en ravines, tandis que la spécificité (*Specificity*) correspond aux vrais négatifs dans toutes les classes d'érosion sans ravines (*Gajowniczek et al., 2014; Pham et al., 2021*) :

$$Sensitivity = \frac{TP}{TP + FN}$$

$$Specificity = \frac{TN}{FP + TN}$$

Où *TP* et *TN* représentent respectivement les vrais positifs et les vrais négatifs, correspondant au nombre de pixels d'érosion en ravines correctement classés. *FN* et *FP* représentent les faux négatifs et les faux positifs, correspondant au nombre de pixels d'érosion en ravines mal classés.

De plus, si l'érosion en ravines est représentée par 1 et l'érosion sans ravines par 0, l'AUC (under the curve), peut être exprimée par l'équation suivante :

$$AUC = \int_0^1 ROC(t)$$

Où *t* est la valeur-seuil.

La performance des modèles appliqués a également été évaluée avec le std. erreur et l'intervalle de confiance à 95 %.

Le modèle est considéré comme inexact si la courbe ROC est inférieure à 0,5. En revanche, le modèle est considéré comme plus précis lorsque la courbe ROC se rapproche de 1 (*Chen et al., 2019*).

4. Résultats de la modélisation

Dans cette étude, les résultats sont présentés en 3 sections, à savoir :

- (1) Analyse des données de multi-colinéarité.
- (2) Cartographie de la susceptibilité à l'érosion en ravines à l'aide des modèles XGBoost, RF, et LR ;
- (3) Validation des cartes de susceptibilité à l'érosion en ravines (GESM, pour Gully Erosion Susceptibility Map).

4.1. Test de multi-colinéarité

Les résultats de l'analyse de la multi-colinéarité entre les 11 variables utilisés pour la prédisposition à l'érosion en ravines dans cette étude sont présentés dans le (Tab. 18).

Avant de sélectionner les facteurs et de créer les cartes de susceptibilité à l'érosion en ravines (GESM, pour Gully Erosion Susceptibility Map), il est nécessaire de vérifier la multi-colinéarité des facteurs utilisés et d'évaluer leur relation afin de confirmer qu'il n'y a pas de multi-colinéarité. Les onze facteurs de prédisposition à l'érosion en ravines ont été analysés en utilisant les indices de tolérance et d'inflation de la variance. Les valeurs obtenues sont affichées dans le (Tab. 18). Les résultats montrent que les valeurs maximales et minimales du VIF (facteur d'inflation de la variance) et du TOL (tolérance) étaient de 3,211 et 0,947, et de 1,054 et 0,354, respectivement.

Finalement, tous les facteurs peuvent être incorporés dans les cartes de susceptibilité à l'érosion en ravines car il n'y a pas de colinéarité en leur sein.

Tab.18. Test de multi-colinéarité entre les facteurs de conditionnement.

Factor	Collinearity	
	Tolerance	VIF
Slope	0.587	1.732
Aspect	0.879	1.054
Elevation	0.947	1.097
TWI	0.802	1.198
Profile curvature	0.812	1.234
Plan curvature	0.798	1.967
NDVI	0.354	2.498
Lithology	0.642	1.563
Distance to streams	0.502	3.014
Distance to roads	0.462	3.211
Distance to faults	0.899	1.189

4.2. Interprétations des résultats obtenues

Les cartes de susceptibilité à l'érosion en ravines produites par les trois algorithmes (RF, XGBoost et LR) ont été classées en cinq catégories basées sur le système de classification de Jenks Natural Breaks (Achour & Pourghasemi, 2020), caractérisant cinq zones différentes dans les cartes d'érosion en ravines : très faible, faible, modérée, élevée et très élevée (Tab. 19).

Tab.19. Classes de susceptibilité de l'érosion en ravines pour les modèles LR et RF et XGBoost.

Map	Susceptibility class	Number of pixels in class	% of pixels in class
XGBoost	Very low	2930	7.23
	Low	13,788	34.00
	Medium	17,431	42.98
	High	4983	12.29
	Very high	1420	3.50
RF	Very low	6248	15.41
	Low	9972	24.59
	Medium	8110	20.00
	High	8112	20.00
	Very high	8110	20.00
LR	Very low	6754	16.66
	Low	16,993	41.90
	Medium	11,711	28.88
	High	4084	10.07
	Very high	1010	2.49

4.2.1. Modèle 1 basé sur la méthode RF

Le modèle de forêt aléatoire a été préparé en utilisant les données d'entraînement (1032 pixels de l'érosion en ravines), où 500 arbres, 3 facteurs testés à chaque fractionnement, et l'ajustement des hyper-paramètres ont été considérés. Les erreurs OOB agrégées, montrées dans la (Fig. 53), ont été utilisées pour définir le nombre d'arbres.

Les modèles avec la valeur OOB la plus faible sont considérés comme les meilleurs modèles (Pourghasemi & Kerle, 2016). Le OOB dans la zone d'étude était de 24.28%. Il est révélé que la précision du modèle est supérieure à 75%, ce qui est une bonne valeur.

Le modèle RF a été appliqué pour obtenir les scores de diminution moyenne de la précision (MDA, pour Mean Decrease in Accuracy) et la diminution moyenne des scores de Gini (MDG, pour Mean Decrease in Gini).

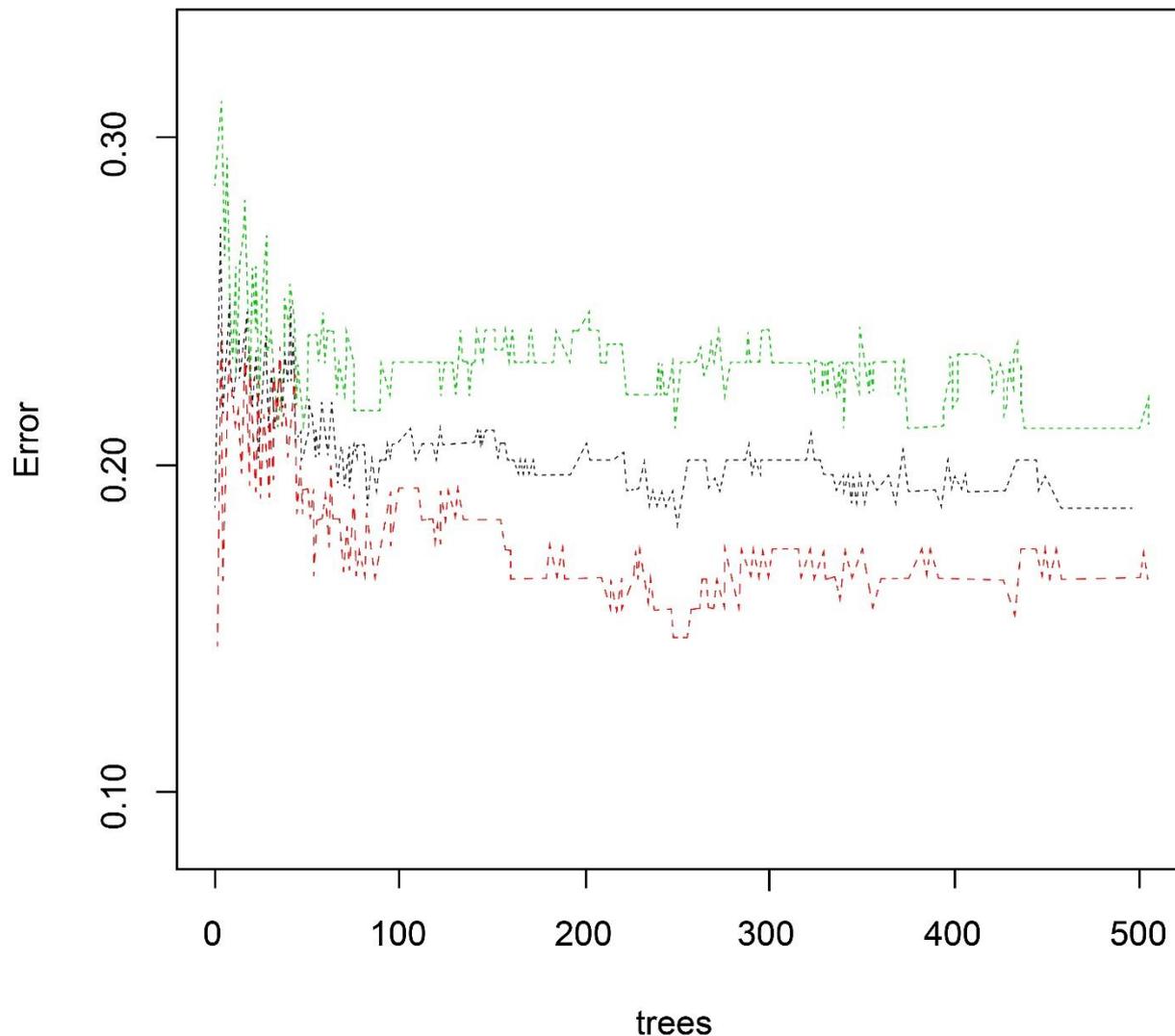


Fig.53. Tracé d'erreur OOB du modèle RF : 0 – non ravin (ligne rouge) et 1 – ravin (ligne verte).

Comme le montre la Fig. 54, cinq facteurs peuvent être considérés comme importants pour l'occurrence et le développement de l'érosion en ravins dans la zone d'étude. La distance aux cours d'eau, le TWI, la lithologie, le gradient de pente et l'élévation sont les facteurs les plus efficaces pour la cartographie de la susceptibilité à l'érosion en ravines.

Sur la base de (MDG), la distance aux routes, la courbure du plan, la distance aux failles, l'aspect de la pente, la courbure du profil et le NDVI ont été classés du 6ème au 11ème respectivement. Les facteurs sont modérément, à faiblement efficaces pour la cartographie de la susceptibilité à l'érosion en ravines.

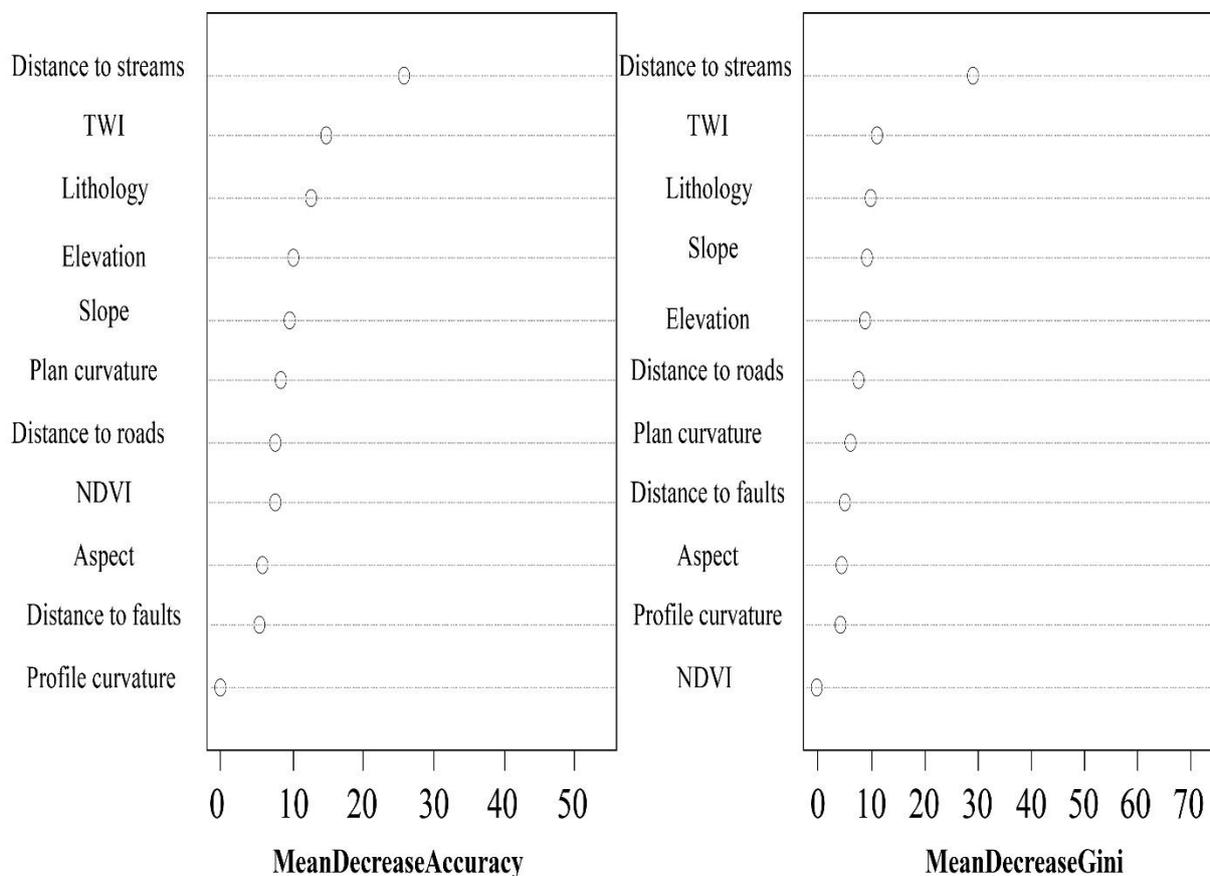


Fig.54. L'importance des facteurs d'influence dans les modèles de susceptibilité de l'érosion en ravines.

La carte de susceptibilité à l'érosion en ravines (GESM) produite par le modèle RF a été classée en cinq classes en utilisant la méthode des ruptures naturelles dans ArcGIS 10.4.

Comme le montre (Fig.55 et Tab. 19), la GESM produite par le modèle RF montre que 40 % du bassin versant total a une susceptibilité à l'érosion en ravines très faible et faible dans la partie Sud-Est du bassin versant du K'sob. Les zones très et hautement susceptibles constituent 40 % de la zone d'étude et sont situées dans la partie Sud-Ouest, où se trouve le barrage du K'sob ainsi que les zones agricoles telles que Rabta, El-Ach et El-Hammadia à partir

desquelles coule l'Oued K'sob. La valeur de la zone modérément susceptible était de 20 % de la zone d'étude et se situe près de Bordj-Ghdir et Ghilassa.

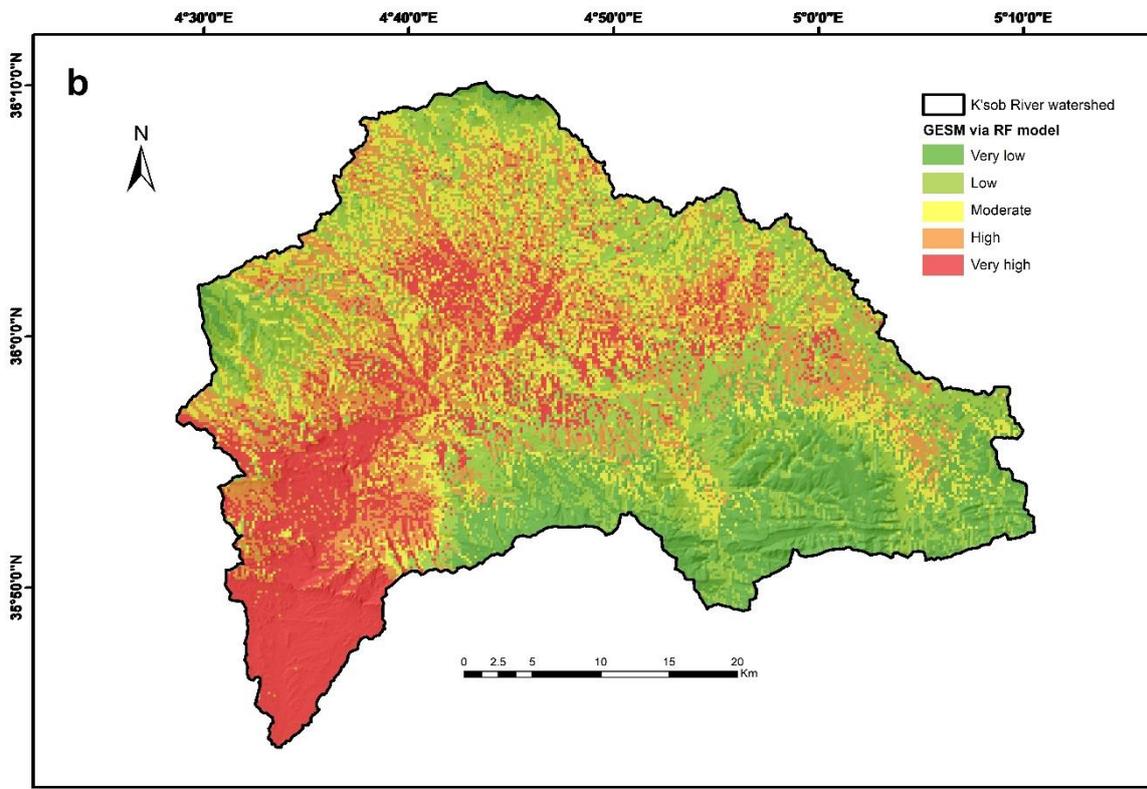


Fig.55. Modèle RF.

4.2.2. Modèle 2 basé sur la méthode XGBoost

XGBoost est une méthode d'apprentissage automatique d'ensemble utilisée pour augmenter la précision des modèles et réduire les problèmes de sur-ajustement. XGBoost est utilisé pour la classification et la régression (Pham et al., 2021).

Dans la présente étude, onze facteurs de prédisposition à l'érosion en ravines ont été utilisés pour préparer les ensembles de données d'entraînement pour l'exécution du modèle XGBoost. Pour atteindre notre objectif et prédire les GES (Gully Erosion Susceptibility = susceptibilité à l'érosion en ravines), les données ont été mélangées et les facteurs ont été séparés (0 = non-ravin ; 1 = ravin).

Pour la méthode XGBoost, les 1032 pixels de l'érosion en ravines ont été utilisés pour créer le modèle. Les paramètres par défaut suivants ont été utilisés pour générer le premier modèle : $m = 200$, $h = 6$, $\eta = 0,3$, $\gamma = 0$, $\delta = 1$, $\zeta = 1$ et $\mu = 1$ (Chen et al., 2020). Par conséquent, nous essayons d'augmenter la précision de ce modèle, qui était égale à 0,821, en exécutant l'optimisation des hyper-paramètres de XGBoost.

Pour identifier les paramètres optimaux, une méthode de recherche en grille a été testée dans cette étude comme suit : (m) a été fixé de 160 à 200, (H) fixé à 6, 12, 18 et 24, (η) fixé à 0,05, 0,5 et 1,0, (γ) fixé à 0, 0,05 et 0,1, (δ) fixé de 0,5 à 2,0 (le pas est de 0,5), (ζ) fixé à 0, 1 et 3,0, et (μ) fixé de 0,5 et 2,0 (le pas est de 0,5).

Sur la base de ce processus, les paramètres optimaux de XGBoost et le RSME résultant sont trouvés dans le (Tab. 20). Les résultats ont montré que le modèle avec les performances maximales présentait une précision de 147,5 %.

Tab.20. Valeurs optimales des paramètres de XGBoost.

Parameter	m	H	η	Γ	δ	ζ	μ	RMSE
XGBoost	180	6	0.3	0.1	0.75	3	1	1.475

number of iterations (m), learning rate (η), maximum tree depth (h), minimum loss reduction (γ), minimum sum of instance weight (ζ), subsample percentage (μ), and subsample ratio of columns (δ).

Afin de prévenir le sur-ajustement, nous avons recours à la méthode de validation croisée à dix volets pour entraîner le modèle XGBoost (Ding et al, 2019). Nous avons obtenu le meilleur modèle XGBoost avec les paramètres suivants : $m = 180$, $h = 6$, $\eta = 0,3$, $\gamma = 0,1$, $\delta = 0,75$, $\zeta = 3$ et $\mu = 1$ (Tab. 20). Nous avons utilisé la version 3.6.3 du logiciel R® pour appliquer XGBoost.

De plus, la Fig. 56 illustre l'efficacité de ce modèle avec des hyper-paramètres divers.

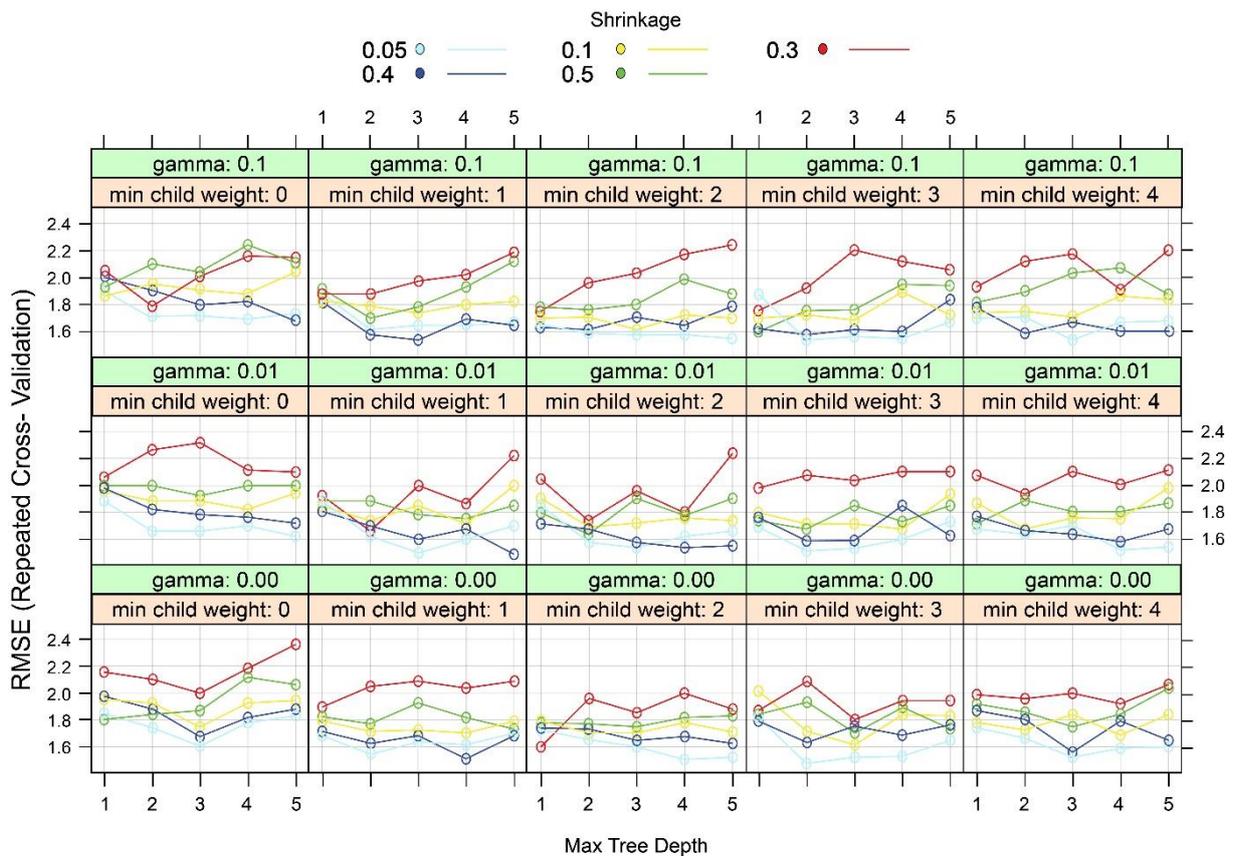


Fig.56. Performance XGBoosts classique avec différents paramètres.

Nous présentons la carte de susceptibilité finale à l'érosion en ravines (GES), obtenue à l'aide de XGBoost, dans le Tab. 20 et Fig. 57. Nous avons classé la carte de susceptibilité finale en cinq catégories selon la division spatiale.

Les résultats de la classification XGBoost GESM révèlent que la zone modérément exposée représente 43 % du bassin versant. Les autres niveaux de susceptibilité à l'érosion en ravines se répartissent comme suit : très faible (7,23 %), faible (34 %), élevé (12,29 %) et très élevé (3,5 %). Les zones les plus érodées sont situées près du barrage de K'sob et de l'Oued K'sob, au Sud-Ouest du bassin versant.

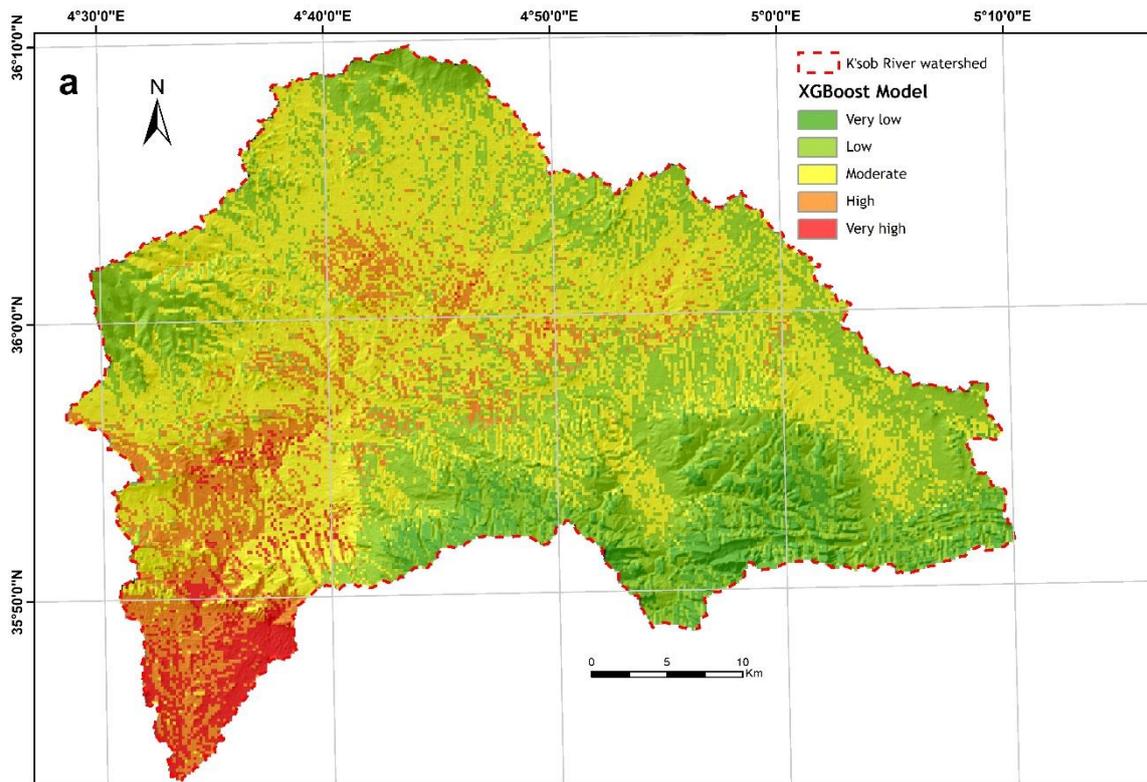


Fig.57. Modèle XGBoost.

4.2.3. Modèle 3 basé sur la méthode LR

Pour le modèle de régression logistique (LR), les coefficients de chaque facteur conditionnant ont été utilisés pour calculer l'indice de susceptibilité à l'érosion en ravines (GESM = Gully Erosion Susceptibility Map). La formule peut être réécrite comme suit :

$$LR = (0,656 \times \text{pente}) + (0,034 \times \text{aspect}) + (0,021 \times \text{élévation}) + (-0,321 \times \text{TWI}) + (-0,022 \times \text{courbure du profil}) + (-0,037 \times \text{courbure du plan}) + (0,016 \times \text{NDVI}) + \text{lithologie} + (1,039 \times \text{distance aux cours d'eau}) + (0,052 \times \text{distance aux routes}) + (-0,158 \times \text{distance aux failles}) - 87,2.$$

Dans cette étude, les coefficients mentionnés ci-dessus ont été multipliés par les facteurs conditionnants respectifs pour obtenir le GESM final (Gully Erosion Susceptibility Map) (Fig. 58).

L'analyse de ces coefficients montre que le gradient de pente (0,656), l'orientation de la pente (0,034), l'élévation (0,021), le NDVI (0,016), la distance aux cours d'eau (1,039), la distance aux routes (0,052), et la lithologie avaient des valeurs positives, indiquant l'importance

de ces facteurs dans l'évaluation de l'érosion en ravine pour le bassin versant de la rivière K'sob.

Les autres facteurs tels que (TWI -0,321, courbure du profil -0,022, courbure du plan -0,037 et distance aux failles -0,158) avaient des coefficients négatifs, les rendant inefficaces pour le processus de modélisation.

La carte de susceptibilité à l'érosion en ravines a été classée en cinq catégories (Fig. 58) en utilisant la méthode des ruptures naturelles (the Natural breaks method) (Du et al., 2017). Les résultats classés de la carte d'indice construite via LR ont révélé que sur la superficie totale du bassin versant de la rivière K'sob, 2,49 % et 10,07 % appartiennent respectivement aux classes très élevée et élevée de susceptibilité à l'érosion en ravines, tandis que 28,88 %, 41,90 % et 16,66 % correspondent respectivement aux classes modérée, faible et très faible de susceptibilité.

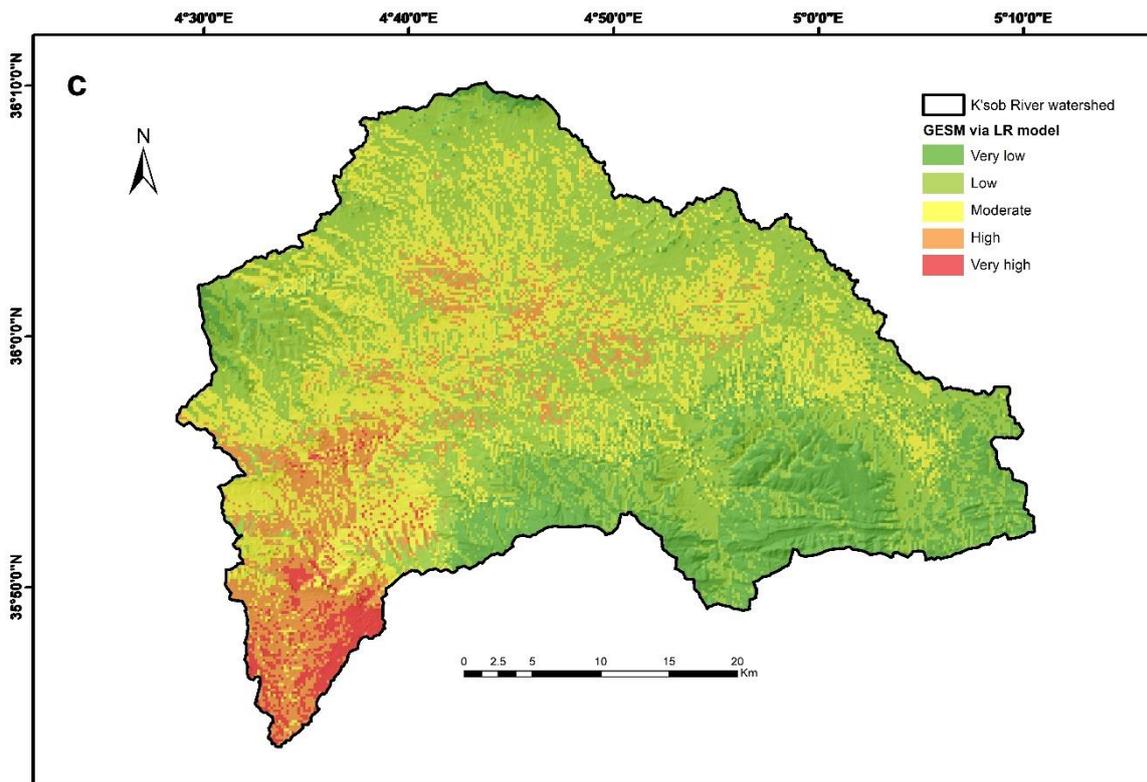


Fig.57. Modèle LR

4.3. Résultats de la validation

La validation de la carte de susceptibilité à l'érosion en ravines (GESM) est une étape importante dans l'évaluation de la susceptibilité à l'érosion en ravines (Gayen *et al.*, 2019). Pour cette étude, trois statistiques d'évaluation, à savoir l'AUC, l'erreur standard et l'intervalle de confiance à 95%, ont été calculées pour estimer l'exactitude des modèles construits (Fig. 58 et Tab. 21). La courbe ROC est une technique populaire et appropriée pour évaluer la précision des modèles GESM (Khosravi *et al.*, 2019). Cette courbe est produite en traçant la sensibilité (taux de vrais positifs) du modèle sur l'axe des y et la spécificité (taux de faux positifs) sur l'axe des x (Achour & Pourghasemi, 2020).

L'exactitude des modèles construits a été évaluée à l'aide de l'AUC, de l'erreur standard et de l'intervalle de confiance à 95%. Selon les valeurs d'AUC, l'exactitude peut être classée en cinq classes, à savoir: médiocre (50-60%), moyenne (60-70%), bonne (70-80%), très bonne (80-90%) et excellente (90-100%) (Yesilnacar & Topal, 2005).

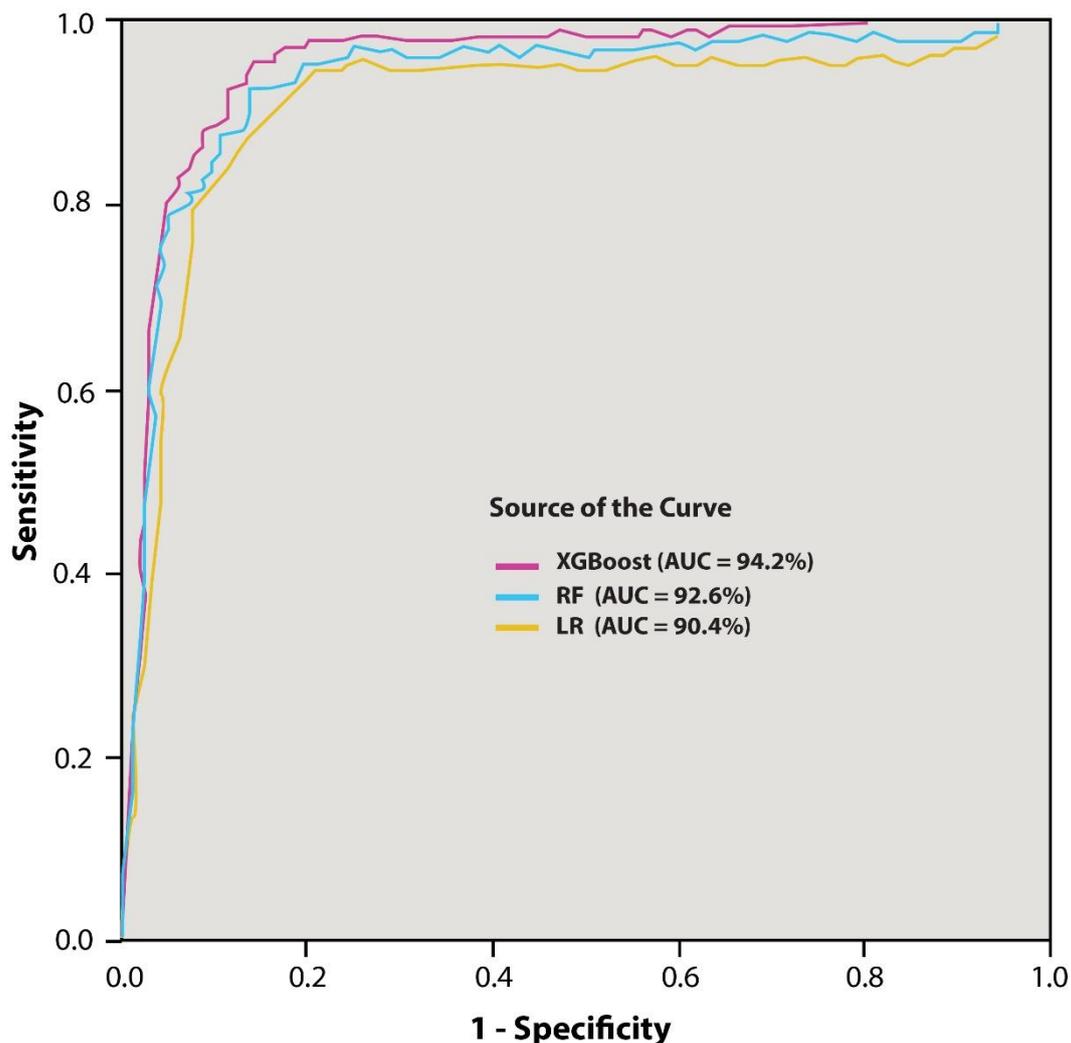


Fig.59. Validation du modèle des cartes de susceptibilité à l'érosion en ravines.

Les résultats présentés dans la (Fig. 59) montrent clairement que les trois modèles ont une excellente précision en fonction de la valeur d'AUC. Avec une valeur d'AUC de 0,942, le modèle XGBoost est le meilleur modèle par rapport aux autres modèles (modèle FR avec une valeur AUC de 0,926 et le modèle LR avec une valeur AUC de 0,904).

Les résultats de l'erreur standard et de l'intervalle de confiance à 95% (Tab. 21) sont en bon accord avec les résultats d'AUC. Le modèle XGBoost avait la plus petite erreur standard (0,009) et le CI le plus étroit (0,893-0,971) par rapport aux modèles RF et LR. L'AUC, l'erreur standard et le CI du modèle RF étaient respectivement de 0,926, 0,014 et 0,873-0,953.

Le modèle LR a la plus mauvaise précision par rapport aux autres modèles, avec une valeur d'AUC de 0,904. Dans cette étude, tous les modèles de prédiction spatiale de l'érosion en ravines présentent une adéquation raisonnable avec les données de validation.

Cela confirme l'importance de l'utilisation des méthodes d'apprentissage automatique dans notre temps actuel pour faciliter l'identification correcte des emplacements de l'érosion en ravines, en accord avec la distribution spatiale de ce phénomène.

Tab.21. Résultats de la procédure de validation.

Models	AUC	Std. error	CI (95%)	
			Lower bound	Upper bound
XGBoost	0.942	0.009	0.893	0.971
RF	0.926	0.014	0.873	0.953

5. Discussions

Ici, les résultats obtenus sont analysés selon les trois parties suivantes :

- (1) comparaison entre les trois modèles en fonction de leurs performances ;
- (2) relation entre les facteurs de prédispositions efficaces et leur impact sur l'érosion en ravines dans la zone d'étude ;
- (3) exploration de l'utilité des modèles finaux dans l'évaluation de la dégradation des terres dans la zone d'étude.

De nombreuses recherches ont été effectuées pour identifier les lieux de l'érosion en ravines et les travaux visant à réduire leurs risques dans le monde, par exemple : (Gayen et al., 2019; Pourghasemi et al., 2020), et de nombreuses méthodes et algorithmes ont été utilisés pour prédire l'occurrence de l'érosion en ravines, tels que : (Arabameri et al., 2020; Arabameri et al., 2018b; Arabameri et al., 2018a; Nhu et al., 2020).

(1)\ Les méthodes utilisées dans cette étude présentent plusieurs avantages pour la modélisation. Leur performance dépend de la qualité des données et des caractéristiques de la zone d'étude (Achour et al., 2021).

Dans la recherche actuelle, le résultat de la validation du modèle montre que le modèle XGBoost était la méthode la plus précise. La meilleure performance de ce modèle peut être due à sa haute précision et son efficacité (Amiri et al., 2019). XGBoost peut ajuster des fonctions absentes avec un processus intégré (Chen et al., 2021). Il peut relier une valeur manquante sur un nœud et le diviser à la fois du côté gauche et du côté droit et découvrir comment un nœud individuel perd plus (Arabameri et al., 2019c).

Le modèle RF s'est classé deuxième dans la cartographie de la susceptibilité à l'érosion en ravines parmi les modèles testés. L'un de ses grands avantages est la capacité à traiter plusieurs facteurs d'entrée sans suppression de variables. Il est capable de gérer les ajustements et les non-linéarités entre les facteurs principaux (Rodriguez-Galiano et al., 2014).

Le modèle LR est inclus dans cette recherche en raison de sa facilité, sa haute efficacité, surtout dans la phase d'interprétation des résultats (Conoscenti et al., 2014).

Les trois modèles ont été vérifiés par plusieurs chercheurs dans divers domaines de recherche, comme la cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain (LSM), la prévision des incendies, l'évaluation de la susceptibilité aux inondations et la cartographie du potentiel des eaux souterraines.

Les trois modèles utilisés dans notre étude reposent directement sur des équations logarithmiques et l'intégration des résultats obtenus dans ArcGIS. Ces outils nous ont grandement facilité la tâche dans le domaine de la géologie, en particulier pour déterminer avec précision et efficacité le risque de plusieurs phénomènes et pour fournir des résultats très satisfaisants qui peuvent aider les décideurs et les autorités officielles à prendre les mesures nécessaires pour réduire leurs effets néfastes, en particulier dans les domaines agricole et économique.

(2)\ Les trois modèles générés dans cette étude montrent clairement que les zones de susceptibilité élevée et très élevée de l'érosion en ravines se situent essentiellement dans la partie centrale du bassin versant de la rivière K'sob et s'étendent jusqu'à son exutoire. Les classes de susceptibilité moyenne adoptent presque la même distribution que les zones de susceptibilité élevée et très élevée avec une légère extension dans les quatre directions. Les zones de faible et très faible susceptibilité sont principalement situées dans les régions de haute altitude.

Nous en déduisons que l'intensité de l'érosion en ravines dépend largement de la longueur du cours d'eau du bassin de la K'sob et qu'avec les fortes pluies, l'érosion du sol fragile augmente et tous les affluents des bassins du cours d'eau de la K'sob collectent la boue et la déversent dans le barrage de la K'sob.

Plusieurs chercheurs ont utilisé différents facteurs dans l'évaluation de la susceptibilité à l'érosion en ravines. La majorité d'entre eux ont utilisé presque les mêmes facteurs dans leur analyse, à savoir l'altitude, les précipitations, l'angle de pente, la courbure, la lithologie, la densité du drainage, l'indice d'humidité topographique, le NDVI, l'orientation de la pente et la distance aux cours d'eau. Des facteurs supplémentaires ont été pris en compte par d'autres chercheurs comme le surpâturage, qui a été ajouté comme facteur de prédisposition par Nicu (Nicu, 2018). De plus, la distance aux routes a été utilisée dans la susceptibilité à l'érosion en ravines par Pourghasemi et al. (Pourghasemi et al., 2017) Dans cette section, nous examinons l'impact des facteurs de prédispositions dans l'apparition de l'érosion en ravines dans le bassin versant de la rivière K'sob.

Les facteurs les plus importants affectant la formation de l'érosion en ravines peuvent être différents d'une zone d'étude à une autre. Dans cette étude, les facteurs critiques pour le GESM ont été obtenus à partir du modèle RF en utilisant les scores MDA et MDG. Les résultats de cette analyse montrent que la distance aux cours d'eau, le TWI, la lithologie, le gradient de pente et l'altitude sont les facteurs les plus efficaces pour le GESM. La connectivité de l'érosion en ravines avec les réseaux hydrographiques peut faciliter le transport des sédiments érodés provenant des zones amont du bassin versant et augmenter la formation de l'érosion en ravines (Conoscenti et al., 2014). Les zones plates sont très susceptibles à l'érosion en ravines (Arabameri et al., 2019d). Dans cette recherche, nous avons trouvé que le TWI élevé est fortement lié au développement de l'érosion en ravines. La localisation des zones de forte et de très forte susceptibilité est considérablement liée à la lithologie de ces zones. Ces zones sont principalement formées par des terrains constitués de terrasses alluviales, d'argiles et de

marnes. Les zones à faible pente ont été propices à l'accumulation des écoulements superficiels qui peuvent provoquer l'érosion en ravines (Arabameri et al., 2019c) Dans la zone d'étude, l'érosion en ravines se sont développés principalement dans les zones situées en dessous de 800 m d'altitude et sur des pentes inférieures à 10°.

L'effet du climat est notable et peut être considéré comme un facteur important dans l'apparition de l'érosion en ravines. La zone d'étude appartient à une région caractérisée par un climat semi-aride, où la précipitation moyenne par an est comprise entre 340 et 400 mm. Au cours de la dernière décennie, il y a un changement climatique remarquable dans cette zone. Les pluies tombent seulement dans les deux premiers mois de l'automne, alors que dans les autres mois, il n'y a pas ou très peu de précipitations. La principale cause de ce changement est l'apparition d'un écoulement intermittent d'eau. Ce dernier est l'un des facteurs clés associés aux changements climatiques dans les régions semi-arides qui affectent le processus d'érosion en ravines.

(3)\ Le seul ordre de grandeur disponible concernant l'importance de l'érosion dans le bassin versant de la rivière K'sob provient d'une étude réalisée par Benkadja et al. (Benkadja et al., 2013). Ils ont évalué la perte de sol et l'envasement du système hydrologique de ce bassin versant en utilisant quatre méthodes directes et indirectes. Dans ce travail, le modèle PISA (en italien : Previsioni dell'Interimento nei Serbatoi Artificiali) est considéré comme le plus robuste pour compléter l'évaluation de la perte de sol, en calculant l'indice d'envasement défini par le volume annuel de sédiments humides versés dans le barrage par unité de surface du bassin versant "Y". Les résultats montrent que ce dernier avait une valeur de $1822 \text{ m}^3 \text{ km}^{-2} \text{ an}^{-1}$. De plus, l'envasement est d'environ $2915 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$, avec une densité de sédiments humides de 1,6. Le bassin versant de la rivière K'sob est sérieusement influencé par l'érosion des sols comme il est mentionné par Benkadja et al. (Benkadja et al., 2013) et constaté par l'érosion en ravines profonds et larges présents dans cette étude, qui ont un rôle important dans le processus de perte de sol.

Pour le meilleur suivi du développement de l'érosion en ravines, nous avons généré les trois modèles (XGBoost, RF et LR). Ces cartes peuvent aider à identifier les zones de dégradation des terres à haute priorité qui peuvent être sélectionnées pour des procédures de restauration ultérieures dans la zone d'étude. Comme mentionné dans la partie 1 de cette section, le modèle XGBoost était le plus précis par rapport aux autres modèles. Plusieurs travaux de terrain ont été réalisés, où nous avons trouvé une forte similitude entre la localisation des zones à haute et très haute susceptibilité de ce modèle et la localisation de l'érosion en

ravines dans plusieurs zones test. Ensuite, une évaluation du rôle de la carte XGBoost pour détecter les zones clés ou “points chauds” est effectuée. Ce modèle prouve sa capacité à détecter ces points chauds dans la zone d’étude. Pour protéger la fertilité et la valeur agronomique des terres agricoles, un point d’échantillonnage a été identifié dans la zone à haute susceptibilité Ce point est une terre agricole endommagée située dans la commune d'*El Hammadia* (Wilaya de Bordj-Bou-Argeridj), qui est soumise à des pratiques de labour qui disloquent le sol et concentrent le ruissellement de surface (*Fig. 60*).

Les modèles ont été validés et les courbes ROC-AUC ont été calculées (*Tab. 21, Fig. 58*). Elles classent les modèles en termes de capacité de prédiction du meilleur au pire, à savoir : XGBoost (AUC = 94,2 %), RF (AUC = 92,6 %) et LR (AUC = 90,4 %). Les différences dans les résultats indiquent que les techniques dépendent fortement de l’ensemble de données obtenu et de la performance qui sous-tend chaque méthode appliquée pour déterminer les zones d’érosion en ravines.

Par conséquent, malgré la difficulté de prédire l’érosion en ravines, l’utilisation de ces modèles et techniques actuelles nous aide à construire et à extraire des cartes qui déterminent l’emplacement de l’érosion en ravines. Ces cartes sont essentielles pour la résolution de plusieurs problèmes environnementaux auxquels les sols sont exposés et permettent de localiser les phénomènes pour les réduire et les minimiser de manière significative.

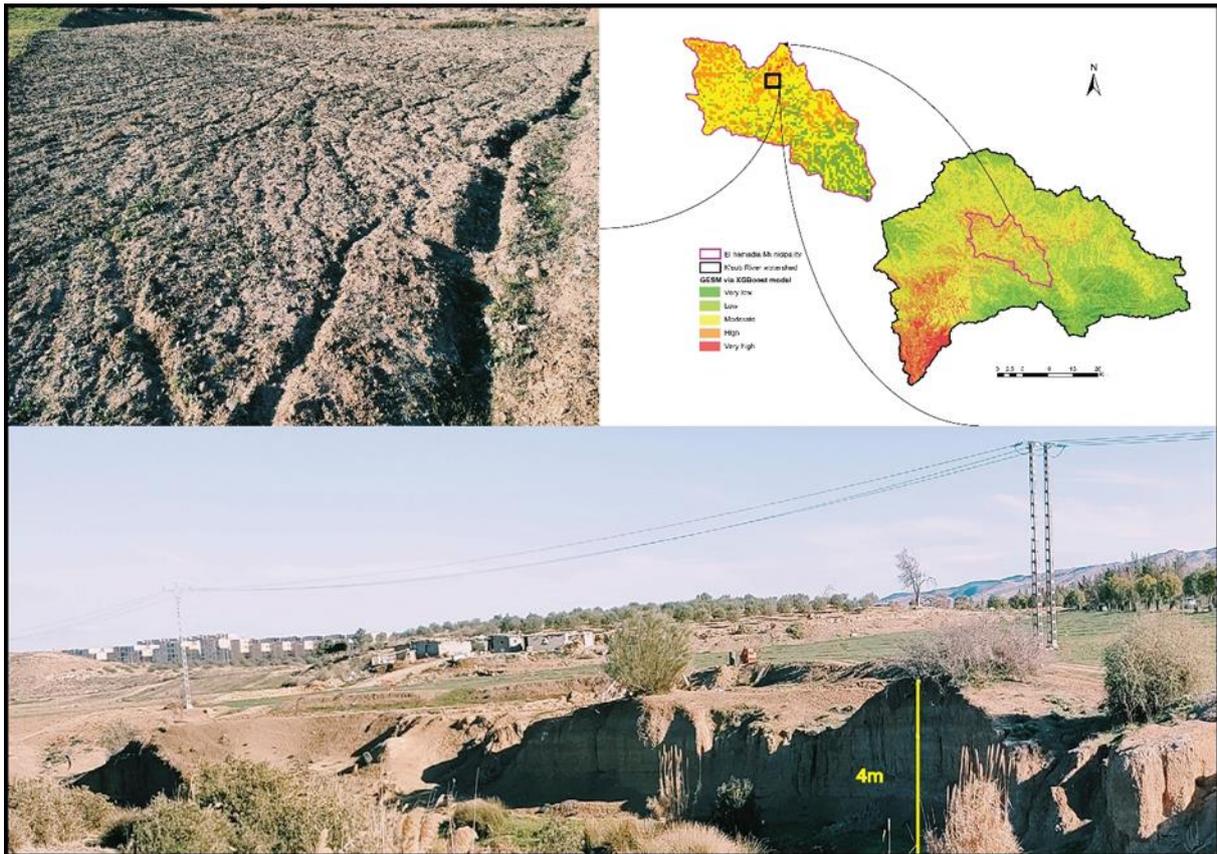


Fig.60. Les pratiques agricoles ayant eu une sérieuse influence sur le remodelage de cette zone de l'érosion en ravines actives.

6. Étude comparative

L'étude de Rachid Benkhadja et ses collaborateurs (*Benkhadja et al., 2015*) a porté sur l'application de trois modèles différents pour estimer l'érosion dans le bassin versant du K'sob. Dans son article scientifique, il a indiqué que la région était exposée au phénomène de l'érosion hydrique en raison de nombreux facteurs tels que le climat, la géologie, le terrain et le facteur humain.

Les trois modèles qu'il a appliqués sont les suivants :

RUSLE : l'équation des pertes en sol universelle révisée (*McCool et al., 1995*), méthode empirique.

ICONA: Institute for the Conservation of the Nature (*Griesbach et al., 1997*).

Gavrilovic : méthode semi-quantitative (*Gavrilovic, 1976*).

Selon la formule de RUSLE, les résultats obtenus montrent que 74% du bassin versant présente une faible perte de sol, 21% une perte moyenne à modérée et les 5% restants de la

région présentent une perte de sol élevée et dangereuse. Ces taux élevés sont concentrés dans le Sud-Est du bassin (Bordj-Ghadir, Ghailassa et Rabta) et sont estimés à $4.6 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$.

Selon la méthode ICONA, 88,8% du bassin présente une faible érosion, 7,1% une érosion modérée et 4,2% une érosion élevée. Les zones de forte érosion se trouvent dans la partie Sud et Sud-Est du bassin versant (Ghailassa et Ouled-Brahim).

En ce qui concerne la méthode Gavrilovic, le taux de sensibilité moyen est d'environ 44%, le taux de sensibilité très élevé se situe entre 20% et 25%, et il est concentré dans le Nord et le Nord-Est du bassin versant (Ras-El-Oued, Belimour, El-Anseur et El-Achir).

Selon les résultats obtenus par Benkhadja et ses collaborateurs dans les trois modèles empiriques appliqués dans leur étude, on remarque une différence notable dans les résultats ainsi qu'une différence dans la distribution spatiale du phénomène d'érosion hydrique. Ces différences créent un certain déséquilibre et rendent les résultats obtenus moins précis. Cependant, il est important de noter que chaque modèle a ses propres forces et faiblesses, et que l'utilisation de plusieurs modèles peut fournir une vue plus complète de la situation. Il peut être utile d'examiner les résultats de chaque modèle en détail pour comprendre les différences et déterminer la meilleure approche pour évaluer l'érosion dans le bassin versant du K'sob.

Lorsque l'on compare les résultats obtenus par Benkhadja et ses collaborateurs et les résultats obtenus dans notre étude, on note des différences entre eux. Les méthodes appliquées par Benkhadja et ses collaborateurs sont des méthodes empiriques et semi-quantitatives, qui sont parmi les premières méthodes appliquées dans ce domaine. Leurs cartes ont été dessinées en utilisant le programme ArcGIS pour localiser la présence de l'érosion hydrique.

Quant à notre étude (XGBoost, RF et LR), vous vous êtes appuyés sur les méthodes d'apprentissage automatique, qui sont actuellement les méthodes les plus courantes et les plus appliquées en raison de leur efficacité et des résultats plus satisfaisants qu'avec les méthodes précédentes. Ces méthodes d'apprentissage automatique permettent de construire des modèles plus précis et de prédire avec plus de précision la présence de l'érosion hydrique dans le bassin versant du K'sob. Cela peut aider à mieux comprendre le phénomène et à prendre des mesures pour le prévenir ou le réduire.

Benkhadja a conclu que les résultats étaient similaires dans les applications ICONA et RUSLE, où il a constaté que les trois quarts du bassin versant présentaient une érosion faible à

très faible, tandis que Gavrilovic a estimé que 70% du bassin versant étaient soumis à une érosion modérée.

En ce qui concerne les résultats obtenus dans notre étude, nous avons clairement noté que les trois modèles ont une excellente précision basée sur la valeur AUC. Les résultats de validation des modèles montrent que le modèle XGBoost était la méthode la plus précise, suivie de RF et LR respectivement. Les zones de susceptibilité élevée et très élevée par ravinement se trouvaient essentiellement dans la partie centrale du bassin versant de la rivière K'sob et s'étendaient jusqu'à son exutoire. Les classes de susceptibilité moyenne adoptent à peu près la même distribution de zones de susceptibilité élevées et très élevées, avec une légère extension dans les quatre directions. Les zones de faible et de très faible susceptibilité se trouvent principalement dans les zones d'altitude élevée.

Lorsque nous avons comparé les résultats obtenus dans notre étude avec les résultats obtenus par Benkhadja et ses collaborateurs, nous avons remarqué une différence remarquable entre eux, car dans son étude, les zones exposées à l'érosion sont concentrées dans la partie Sud et Sud-Est du bassin versant. Mais pour notre étude, l'érosion est concentrée au centre du bassin versant, là où se situe l'Oued K'sob.

Ces différences peuvent être dues à plusieurs facteurs, tels que les méthodes utilisées pour estimer l'érosion, les données disponibles et leur qualité, ainsi que les hypothèses et les paramètres utilisés dans chaque modèle. Il peut être utile d'examiner en détail les résultats de chaque étude pour comprendre ces différences et déterminer la meilleure approche pour évaluer l'érosion dans le bassin versant du K'sob.

En comparant les résultats obtenus par Benkhadja et ses collaborateurs et les résultats obtenus dans notre étude, on peut constater des différences notables. Les méthodes utilisées par Benkhadja et ses collaborateurs sont des méthodes empiriques et semi-quantitatives, tandis que notre étude utilise des méthodes d'apprentissage automatique plus récentes et plus avancées. Ces différences dans les méthodes peuvent expliquer en partie les différences dans les résultats.

En général, il est important de noter que l'évaluation de l'érosion hydrique quel que soit leur type dans un bassin versant est une tâche complexe qui peut être influencée par de nombreux facteurs. L'utilisation de différentes méthodes peut fournir des perspectives différentes sur le phénomène et aider à mieux comprendre la situation. Il peut être utile de continuer à explorer différentes approches pour évaluer l'érosion dans le bassin versant du

K'sob afin de mieux comprendre le phénomène et de prendre des mesures pour le prévenir ou le réduire.

7. Conclusion

L'érosion en ravines est un phénomène qui s'est largement répandu ces dernières années dans la région de Bordj-Bou-Argeridj et qui deviendra une zone clairement favorable à ce phénomène dans les années à venir, en raison de la faible couverture végétale, des fortes pentes et des fortes précipitations, surtout en automne et en hiver, sans oublier le facteur humain qui a un impact important sur l'environnement.

L'érosion en ravines a eu des effets négatifs sur la structure du sol et sur la dégradation des terres, notamment agricoles. Par conséquent, dans votre étude, nous avons choisi trois méthodes différentes (XGBoost, RF et LR), qui sont les plus couramment utilisées à l'heure actuelle car elles donnent des résultats très satisfaisants, pour évaluer ce phénomène et comparer les résultats obtenus, afin de créer un plan de développement régional pour le réduire et minimiser ses effets négatifs sur l'économie nationale.

Les résultats obtenus indiquent que les deux techniques d'apprentissage automatique (XGBoost et RF) sont plus performantes que LR et ont donné une bonne précision dans la prédiction de l'érosion en ravines. Nous avons obtenu des cartes très satisfaisantes qui permettent de localiser les zones d'érosion en ravines et de prévoir raisonnablement l'avenir. Ces résultats sont encourageants et peuvent aider à mieux comprendre le phénomène d'érosion en ravines dans la région de Bordj-Bou-Argeridj et à prendre des mesures pour le prévenir ou le réduire.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Le phénomène de l'érosion en ravines constitue une grande préoccupation et un danger menaçant pour la fertilité des terres agricoles en premier lieu, ainsi qu'un problème environnemental varié au niveau du bassin versant de la rivière K'sob. Il est donc nécessaire d'améliorer notre connaissance pour prévoir ce phénomène à l'échelle régionale.

Nous avons entamé la rédaction de notre thèse en 2019, et notre objectif principal était d'analyser la distribution spatiale de l'érosion en ravines et d'identifier les zones susceptibles au développement de l'érosion en ravines en utilisant trois méthodes scientifiques modernes basées sur l'apprentissage automatique pour cartographier l'érosion en ravines.

Nous pouvons résumer la thèse en quatre éléments importants, qui sont les suivants :

- _ Utiliser des modèles et des techniques innovants de modélisation, tels que : RF, XGBoost, et LR, pour apporter des réponses complètes et pertinentes sur le phénomène de l'érosion en ravines dans le bassin versant de la rivière du K'sob ;

- _ Analyser les facteurs qui influencent l'évolution de l'érosion en ravines au cours du temps ;

- _ Sélectionner le meilleur modèle appliqué dans notre étude, qui est XGBoost afin de déterminer la répartition spatiale du phénomène.

- _ Approfondir la compréhension du phénomène à travers les cartes de susceptibilité à l'érosion en ravines qui aident les acteurs locaux à prévenir les risques du phénomène avant qu'il ne s'aggrave.

Dans cette étude, nous nous sommes intéressés aux effets de l'érosion hydrique dans le bassin versant de la rivière K'sob, situé dans le Nord-Est de l'Algérie, notamment l'érosion en ravines. Dans **le premier chapitre**, nous avons d'abord réalisé une étude générale incluant la définition du phénomène d'érosion hydrique avec ses types, causes et formes. Ensuite, nous avons présenté certaines méthodes d'estimation du taux d'érosion hydrique, telles que l'apprentissage automatique, les méthodes statistiques et les méthodes empiriques. Toutes ces méthodes ont été mises en œuvre en cartes de susceptibilité à l'érosion hydrique à l'aide de systèmes d'information géographique. À la fin du premier chapitre, nous avons passé en revue quelques études antérieures réalisées dans différents pays du monde et les méthodes employées pour évaluer et identifier les zones vulnérables au phénomène d'érosion hydrique.

Dans **le deuxième chapitre**, nous avons commencé par une description générale au grand bassin versant de Hodna qui englobe notre zone d'étude.

Conclusion Générale

Nous avons ensuite décrit le bassin versant de K'sob selon ses caractéristiques géomorphologiques et géologiques, telles que sa superficie de 1 750 kilomètres carrés, son périmètre de 241,7 kilomètres, sa forte topographie, sa forme rectangulaire avec un temps de concentration de 12,75 heures et sa densité de drainage de 8,68 km⁻¹.

Nous avons également examiné les unités géologiques de la région, qui ont toutes un impact direct sur le développement du phénomène d'érosion hydrique. Nous avons ensuite discuté du climat de la région, en notant que le bassin de l'Oued K'sob a un climat semi-aride, avec des hivers froids et des étés chauds, une température moyenne annuelle d'environ 15,77 degrés Celsius, et une précipitation moyenne annuelle d'environ 378,24 millimètres et l'évapotranspiration réelle de 868,1 mm.

Dans **le chapitre trois**, nous avons présenté les différentes variables prédictives, qui sont au nombre de 11, ainsi que la variable à modéliser, qui est l'érosion en ravins. Cette dernière a été choisie selon deux méthodes :

1. Localisation visuelle des formes d'érosion à partir des images satellitaires.
2. Confirmation du travail effectué dans la phase 01 par la localisation des formes d'érosion sur le terrain à l'aide du GPS.

Au cours de votre travail, nous avons tout d'abord identifié les sites d'érosion en ravines grâce à des visites sur le terrain effectuées entre février 2020, mars 2020, avril 2020 et mai 2020, qui ont permis de localiser 565 formes d'érosion.

11 facteurs de prédisposition ont été sélectionnés comme entrées pour les modèles de cartographie de la susceptibilité à l'érosion en ravines dans cette étude. Ces facteurs sont : l'altitude, le degré de pente, l'exposition des versants, la courbure du plan, la courbure du profil, la proximité aux routes, la proximité aux failles, la proximité aux réseaux hydrographiques, l'indice d'humidité topographique (TWI), l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) et la lithologie.

Nous avons préparé 11 cartes à l'aide d'ArcGIS. Chacune de ces cartes représente un facteur de prédisposition ayant un impact direct sur l'occurrence de l'érosion hydrique et jouant un rôle majeur dans la création de la carte de susceptibilité à l'érosion en ravines. Ces cartes peuvent être utiles pour comprendre le phénomène d'érosion en ravines dans la région et pour prendre des mesures pour le prévenir ou le réduire.

Conclusion Générale

Dans **le quatrième et dernier chapitre**, trois modèles d'apprentissage automatique ont été appliqués pour cartographier la susceptibilité à l'érosion en ravines : RF, XGBoost et LR. Les tests des trois approches proposées dans notre recherche ont montré des résultats très satisfaisants et proches les uns des autres, la méthode XGBoost s'étant avérée être le meilleur modèle.

Les modèles ont été validés et les courbes ROC-AUC ont été calculées. Ils ont été classés en termes de pouvoir prédictif, du meilleur au pire, à savoir : XGBoost (AUC = 94,2 %), RF (AUC = 92,6 %) et LR (AUC = 90,4 %). Les différences dans les résultats indiquent que les techniques dépendent fortement de l'ensemble de données obtenu pour identifier les zones d'érosion en ravines.

Le modèle XGBoost a été le plus précis par rapport aux autres modèles. Plusieurs travaux sur le terrain ont été effectués, où nous avons trouvé une grande similitude entre l'emplacement des régions à haute et très haute sensibilité dans ce modèle et l'emplacement des vallées dans de nombreuses régions de test. Ce modèle prouve sa capacité à détecter ces points chauds dans la zone d'étude, afin de protéger la fertilité et la valeur agronomique des terres.

Enfin, nous avons comparé les résultats obtenus par nous et ceux obtenus par Benkhadja et ses collaborateurs. Nous avons remarqué une différence en termes de distribution spatiale de ce phénomène, ce qui prouve que les programmes et méthodes utilisés dans notre étude sont plus précis que ceux de son prédécesseur. Les résultats de notre étude sont donc très satisfaisants.

Bien qu'il soit difficile de prédire l'érosion en ravines en raison du manque de données et de l'impossibilité de les obtenir, l'utilisation de ces modèles et techniques nous aide actuellement à créer et extraire des cartes qui déterminent l'emplacement en ravines. Ces cartes sont nécessaires pour résoudre de nombreux problèmes environnementaux auxquels la terre est exposée en raison d'événements dangereux, afin de réduire considérablement l'impact de ces événements et de préserver les terres agricoles en premier lieu.

L'utilisation efficace de ces cartes dans la phase de planification peut apporter des avantages significatifs en matière d'aménagement du territoire ou de construction urbaine. Cette dernière peut être menée dans des zones à faible susceptibilité, ce qui pourrait réduire efficacement les pertes liées aux dangers environnementaux. De plus, les résultats de cette étude peuvent aider à identifier les zones prioritaires de dégradation des terres qui peuvent être

Conclusion Générale

sélectionnées pour des procédures de restauration ultérieures dans la zone d'étude. Il constitue un possible support pour l'estimation des dommages causés aux agriculteurs par ce danger. Une coopération avec les autorités compétentes est nécessaire afin de leur fournir ces cartes pour effectuer leur évaluation de ce phénomène.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

A, D. (2011). *Contribution à l'étude de l'érosion et du ruissellement des sols rouges dans les monts de Tlemcen : Utilisation de simulation de pluies* Université de Tlemcen .]. <http://dspace.univ-tlemcen.dz/handle/112/1210>

A. Kavian, A. A., , K. S., & Vahabzadeh, a. G. (2010). Effect of soil properties on runoff and soil erosion in forest lands. *Journal of Range and Watershed Management, Iranian Journal of Natural Resources*, 63, 89-104. https://jrwm.ut.ac.ir/article_22579.html?lang=en

Abdellah El Hmaidi, P. (2016). Apports Du Modele Numerique De Terrain Mnt A La Modelisation Du Relief Et Des Caracteristiques Physiques Du Bassin Versant Du Moyen Beht En Amont Du Barrage El Kansera (Sillon Sud Rifain, Maroc). <https://doi.org/10.19044/esj.2016.v12n29p258>

Abelson, H., & Sussman, G. J. (1996). *Structure and interpretation of computer programs*. The MIT Press. <http://library.oapen.org/handle/20.500.12657/26092>

Achour, Y., & Pourghasemi, H. R. (2020). How do machine learning techniques help in increasing accuracy of landslide susceptibility maps? *Geoscience Frontiers*, 11(3), 871-883. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gsf.2019.10.001>

Achour, Y., Boumezbeur, A., Hadji, R., Chouabbi, A., Cavaleiro, V., & Bendaoud, E. A. (2017). Landslide susceptibility mapping using analytic hierarchy process and information value methods along a highway road section in Constantine, Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*, 10, 1-16. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s12517-017-2980-6>

Achour, Y., García, S., & Cavaleiro, V. (2018). GIS-based spatial prediction of debris flows using logistic regression and frequency ratio models for Zêzere River basin and its surrounding area, Northwest Covilhã, Portugal. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(18), 550. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s12517-018-3920-9>

Achour, Y., Saidani, Z., Touati, R., Pham, Q. B., Pal, S. C., Mustafa, F., & Balik Sanli, F. (2021). Assessing landslide susceptibility using a machine learning-based approach to achieving land degradation neutrality. *Environmental Earth Sciences*, 80, 1-20. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s12665-021-09889-9>

Aditian, A., Kubota, T., & Shinohara, Y. (2018). Comparison of GIS-based landslide susceptibility models using frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network in a tertiary region of Ambon, Indonesia. *Geomorphology*, 318, 101-111. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.06.006>

Références bibliographiques

Agricoles, C. C. N. d. E. (2007). *Elaboration d'une étude sur l'état de désertification pour une gestion durable des RN*, Avril 2007.

Agterberg, F., Bonham-Carter, G. F., & Wright, D. (1990). Statistical pattern integration for mineral exploration. In *Computer applications in resource estimation* (pp. 1-21). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-037245-7.50006-8>

Ahmad, N. S. B. N., Mustafa, F. B., & Didams, G. (2020). A systematic review of soil erosion control practices on the agricultural land in Asia. *International Soil and Water Conservation Research*, 8(2), 103-115. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2020.04.001>

Al-Durrah, M., & Bradford, J. (1982). The mechanism of raindrop splash on soil surfaces. *Soil Science Society of America Journal*, 46(5), 1086-1090. <https://doi.org/https://doi.org/10.2136/sssaj1982.03615995004600050040x>

Ali, Y. A. (2007). *Les aménagements de conservation des eaux et des sols en banquettes: Analyse, fonctionnement et essai de modélisation en milieu méditerranéen (El-Gouazine, Tunisie Centrale)* Montpellier 2]. <https://www.theses.fr/2007MON20151#>

Amare, S., Langendoen, E., Keesstra, S., Ploeg, M. v. d., Gelagay, H., Lemma, H., & Zee, S. E. v. d. (2021). Susceptibility to gully erosion: Applying random forest (RF) and frequency ratio (FR) approaches to a small catchment in Ethiopia. *Water*, 13(2), 216. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/w13020216>

Amiri, M., Pourghasemi, H. R., Ghanbarian, G. A., & Afzali, S. F. (2019). Assessment of the importance of gully erosion effective factors using Boruta algorithm and its spatial modeling and mapping using three machine learning algorithms. *Geoderma*, 340, 55-69. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/w13020216>

An, P., Moon, W., & Rencz, A. (1991). Application of fuzzy set theory for integration of geological, geophysical and remote sensing data. *Canadian Journal of Exploration Geophysics*, 27(1), 1-11. <https://doi.org/10.13140/2.1.5054.5440>

Angileri, S. E., Conoscenti, C., Hochschild, V., Märker, M., Rotigliano, E., & Agnesi, V. (2016). Water erosion susceptibility mapping by applying stochastic gradient treeboost to the Imera Meridionale river basin (Sicily, Italy). *Geomorphology*, 262, 61-76. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.03.018>

Références bibliographiques

Arabameri, A., Cerda, A., Rodrigo-Comino, J., Pradhan, B., Sohrabi, M., Blaschke, T., & Tien Bui, D. (2019b). Proposing a novel predictive technique for gully erosion susceptibility mapping in arid and semi-arid regions (Iran). *Remote Sensing*, *11*(21), 2577. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/rs11212577>

Arabameri, A., Chandra Pal, S., Costache, R., Saha, A., Rezaie, F., Seyed Danesh, A., Pradhan, B., Lee, S., & Hoang, N.-D. (2021). Prediction of gully erosion susceptibility mapping using novel ensemble machine learning algorithms. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, *12*(1), 469-498. <https://doi.org/https://orcid.org/0000-0002-1142-1666>

Arabameri, A., Chen, W., Loche, M., Zhao, X., Li, Y., Lombardo, L., Cerda, A., Pradhan, B., & Bui, D. T. (2020). Comparison of machine learning models for gully erosion susceptibility mapping. *Geoscience Frontiers*, *11*(5), 1609-1620. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gsf.2019.11.009>

Arabameri, A., Pradhan, B., & Lombardo, L. (2019d). Comparative assessment using boosted regression trees, binary logistic regression, frequency ratio and numerical risk factor for gully erosion susceptibility modelling. *Catena*, *183*, 104223. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104223>

Arabameri, A., Pradhan, B., & Rezaei, K. (2019a). Gully erosion zonation mapping using integrated geographically weighted regression with certainty factor and random forest models in GIS. *Journal of environmental management*, *232*, 928-942. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.110>

Arabameri, A., Pradhan, B., & Rezaei, K. (2019c). Spatial prediction of gully erosion using ALOS PALSAR data and ensemble bivariate and data mining models. *Geosciences Journal*, *23*, 669-686. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s12303-018-0067-3>

Arabameri, A., Pradhan, B., Rezaei, K., Yamani, M., Pourghasemi, H. R., & Lombardo, L. (2018b). Spatial modelling of gully erosion using evidential belief function, logistic regression, and a new ensemble of evidential belief function–logistic regression algorithm. *Land Degradation & Development*, *29*(11), 4035-4049. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/ldr.3151>

Références bibliographiques

Arabameri, A., Rezaei, K., Pourghasemi, H. R., Lee, S., & Yamani, M. (2018a). GIS-based gully erosion susceptibility mapping: a comparison among three data-driven models and AHP knowledge-based technique. *Environmental Earth Sciences*, 77, 1-22. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s12665-018-7808-5>

Arnold, J., Wall, G., Moore, N., Baldwin, C., & Shelton, U. (1989). Fiche technique: L'érosion du sol-Causes et Effets. *Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires Rurales de l'Ontario, Division Agriculture et Affaires Rurales, Guelph*.

Atkinson, P. M., & Massari, R. (1998). Generalised linear modelling of susceptibility to landsliding in the central Apennines, Italy. *Computers & Geosciences*, 24(4), 373-385. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(97\)00117-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0098-3004(97)00117-9)

Aussenac, G., & Boulangeat, C. (1980). Interception des précipitations et évapotranspiration réelle dans des peuplements de feuillu (*Fagus silvatica* L.) et de résineux (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb) Franco). *Annales des Sciences forestières*,

Avand, M., Janizadeh, S., Naghibi, S. A., Pourghasemi, H. R., Khosrobeigi Bozchaloei, S., & Blaschke, T. (2019). A comparative assessment of random forest and k-nearest neighbor classifiers for gully erosion susceptibility mapping. *Water*, 11(10), 2076. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/w11102076>

BALLA, F. (2019). *Modélisation des flux hydro-sédimentaires et cartographie des zones à risques d'érosion hydrique dans certains bassins versants des hauts plateaux constantinois* Université de Batna 2]. <http://dspace.univ-batna2.dz/handle/123456789/685>

BENCHETTOUH, A. (2012). *Etude des risques d'érosion hydrique du sol au moyen du Système d'Information Géographique (SIG): cas de la zone marneuse du bassin versant de l'Oued Mina-Algérie* Université de Mostaganem-Abdelhamid Ibn Badis]. <https://www.pnst.cerist.dz/detail.php?id=62249>

<http://hdl.handle.net/123456789/1218>

Benkadja, R., Boussag, F., & Benkadja, A. (2015). Identification et évaluation du risque d'érosion sur le bassin versant du K'sob (Est Algérien). *Bulletin of Engineering Geology & the Environment*, 74(1). <https://doi.org/10.1007/s10064-014-0611-y>

Références bibliographiques

Benkadja, R., Hattab, A., Mahdaoui, N., & Zehar, C. (2013). Assessment of soil losses and siltation of the K'sob hydrological system (semiarid area—East Algeria). *Arabian Journal of Geosciences*, 6, 3959-3968. <https://doi.org/10.1007/s12517-012-0653-z>

BENSAADALLAH Mebarka, T. S. (2020). *Etude de variabilité spatio-temporelle des précipitations moyennes annuelles dans le bassin versant de chott El Hodna*

Benselama, O., Mazour, M., Hasbaia, M., Djoukbal, O., & Mokhtari, S. (2018). Prediction of water erosion sensitive areas in Mediterranean watershed, a case study of Wadi El Maleh in north-west of Algeria. *Environmental monitoring and assessment*, 190(12), 735. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-7117-1>

Bergsma, E., Charman, P., Gibbons, F., Hurni, H., Moldenhauer, W., & Panichapong, S. (1996). *Terminology for soil erosion and conservation*. ISSS: ITC: ISRIC.

Bernardi, F., & Bocconcino, M. (2005). La Valutazione Ambientale Strategica dei XX Giochi Olimpici Invernali Torino 2006. In *La Valutazione Ambientale Strategica dei XX Giochi Olimpici Invernali Torino 2006* (Vol. 1, pp. 10-22). EdicomEdizioni. <http://hdl.handle.net/11583/1605976>

Bissonnais, Y. I. (1990). Experimental study and modelling of soil surface crusting processes. *Catena, Supplement*(17), 13-28.

Borges, A. L. (1993). *Modélisation de l'érosion sur deux bassins versants expérimentaux des Alpes du Sud* Université Joseph-Fourier-Grenoble I].

Bouguerra, H., Bouanani, A., Khanchoul, K., Derdous, O., & Tachi, S. E. (2017). Mapping erosion prone areas in the Bouhamdane watershed (Algeria) using the Revised Universal Soil Loss Equation through GIS. *Journal of Water and Land Development*, 32(1), 13. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1515/jwld-2017-0002>

BOUHADEB, C. (2019). *Evaluation du transport solide au niveau du bassin versant de Oued Bounamoussa et ses incidences sur l'envasement du barrage de Cheffia (Nord-Est algérien)* Université de Batna 2]. <http://dspace.univ-batna2.dz/handle/123456789/691>

BOURAHLA, L. (2016). *Impact du changement climatique sur le régime hydrologique du bassin versant de l'Oued Ksob* Université Mohamed Boudiaf-M'sila]. <http://dspace.univ-msila.dz:8080/xmlui/handle/123456789/1228>

Références bibliographiques

Bouteldja, N. (2005). *Contribution à la modélisation de l'érosion hydrique dans le bassin versant du Hodna" sous bassins versants du Ksob et de Soubella"(Algérie)* Aix-Marseille 1].

Bouزيد, N., & Mokhtar, H. (2006). Problématique des zones steppiques algériennes et perspectives d'avenir. *el-Bahith Review*, 4(1), 13-19.

Brahim, A. (2018). Quantification de l'érosion hydrique en utilisant le modèle rusle et déposition intégrée dans un sig. cas du bassin versant de l'oued isly (Maroc Oriental). *European Scientific Journal*, 14(5), 1857-7881. <https://doi.org/https://dx.doi.org/10.19044/esj.2018.v14n5p373>

Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine learning*, 45, 5-32. <https://doi.org/https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>

Brovelli, M. A., Sun, Y., & Yordanov, V. (2020). Monitoring forest change in the amazon using multi-temporal remote sensing data and machine learning classification on Google Earth Engine. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(10), 580. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ijgi9100580>

Bunza, G. (1996). *Abfluss-und Abtragsprozesse in Wildbacheinzugsgebieten: Grundlagen zum integralen Wildbachschutz*. na.

Burrough, P. A., McDonnell, R. A., & Lloyd, C. D. (2015). *Principles of geographical information systems*. Oxford University Press, USA.

Cardinali, M., Reichenbach, P., Guzzetti, F., Ardizzone, F., Antonini, G., Galli, M., Cacciano, M., Castellani, M., & Salvati, P. (2002). A geomorphological approach to the estimation of landslide hazards and risks in Umbria, Central Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2(1/2), 57-72. <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/nhess-2-57-2002>

Carranza, E. J. M., & Hale, M. (2001). Geologically constrained fuzzy mapping of gold mineralization potential, Baguio district, Philippines. *Natural Resources Research*, 10, 125-136. <https://doi.org/https://doi.org/10.1023/A:1011500826411>

Cerdan, O. (2001). *Analyse et modélisation du transfert de particules solides à l'échelle de petits bassins versants cultivés* Orléans]. <https://hal.inrae.fr/tel-02832802>

Références bibliographiques

Chakraborty, T., Alam, M. S., & Islam, M. (2019). Landslide susceptibility mapping using XGBoost model in Chittagong District, Bangladesh. Proceedings on International Conference on Disaster Risk Management, Dhaka, Bangladesh,

Chaplot, V., & Le Bissonnais, Y. (2000). Field measurements of interrill erosion under different slopes and plot sizes. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 25(2), 145-153. [https://doi.org/https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(200002\)25:2%3C145::AID-ESP51%3E3.0.CO;2-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(200002)25:2%3C145::AID-ESP51%3E3.0.CO;2-3)

Charbel, L., & Hassan, H. E. H. (2016). Modélisation de la perte de sol dans la forêt de Bkassine (Liban sud). La géographie physique et les risques de pertes et préjudices liés aux changements climatiques.,

Chen, J., Zhao, F., Sun, Y., & Yin, Y. (2020). Improved XGBoost model based on genetic algorithm. *International Journal of Computer Applications in Technology*, 62(3), 240-245. <https://doi.org/https://doi.org/10.1504/IJCAT.2020.106571>

Chen, T., & Guestrin, C. (2016). Xgboost: A scalable tree boosting system. Proceedings of the 22nd acm sigkdd international conference on knowledge discovery and data mining,

Chen, T., He, T., Benesty, M., Khotilovich, V., Tang, Y., Cho, H., Chen, K., Mitchell, R., Cano, I., & Zhou, T. (2015). Xgboost: extreme gradient boosting. *R package version 0.4-2*, 1(4), 1-4.

Chen, W., Fan, L., Li, C., & Pham, B. T. (2019). Spatial prediction of landslides using hybrid integration of artificial intelligence algorithms with frequency ratio and index of entropy in nanzheng county, china. *Applied Sciences*, 10(1), 29. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/app10010029>

Chen, W., Lei, X., Chakraborty, R., Pal, S. C., Sahana, M., & Janizadeh, S. (2021). Evaluation of different boosting ensemble machine learning models and novel deep learning and boosting framework for head-cut gully erosion susceptibility. *Journal of environmental management*, 284, 112015. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112015>

Chen, X.-W., & Liu, M. (2005). Prediction of protein–protein interactions using random decision forest framework. *Bioinformatics*, 21(24), 4394-4400. <https://doi.org/https://doi.org/10.1093/bioinformatics/bti721>

Références bibliographiques

Choi, Y., Park, H.-D., & Sunwoo, C. (2008). Flood and gully erosion problems at the Pasir open pit coal mine, Indonesia: A case study of the hydrology using GIS. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 67, 251-258. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10064-008-0131-8>

Choubin, B., Rahmati, O., Tahmasebipour, N., Feizizadeh, B., & Pourghasemi, H. R. (2019). Application of fuzzy analytical network process model for analyzing the gully erosion susceptibility. *Natural hazards gis-based spatial modeling using data mining techniques*, 105-125. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-73383-8_5

Clément, V. (2004). Méthodes de contrôle de l'érosion, Guide pratique. *Biofilia inc.* http://municipalite.duhamel.qc.ca/pdfs/PDF_314.pdf (Page consultée en ligne le 10 janvier 2014).

Conforti, M., Aucelli, P. P., Robustelli, G., & Scarciglia, F. (2011). Geomorphology and GIS analysis for mapping gully erosion susceptibility in the Turbolo stream catchment (Northern Calabria, Italy). *Natural hazards*, 56, 881-898. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11069-010-9598-2>

Conoscenti, C., Angileri, S., Cappadonia, C., Rotigliano, E., Agnesi, V., & Märker, M. (2014). Gully erosion susceptibility assessment by means of GIS-based logistic regression: A case of Sicily (Italy). *Geomorphology*, 204, 399-411. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.08.021>

Corbonnois, J., Laurent, F., Andreu-Boussut, V., Messner, F., Roberto, V., Medeiros Vieira, R., & Sogue, M. (2014). L'intensification des pratiques agricoles et la mobilisation des ressources naturelles dans La Pampa du Sud du Brésil. *Vertigo*, 14(1). <https://id.erudit.org/iderudit/1027956ar>

Cornélis, B., & Billen, R. (2001). La cartographie des risques et les risques de la cartographie. 90-5201-944-4.

CORREIA, R. d. B. (2007). Modelação cartográfica em ambiente SIG de suscetibilidade à erosão hídrica dos solos, caso da bacia da Ribeira dos Picos, Santiago (Cabo Verde). *Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra (Dissertação de Mestrado em Geografia Física e Estudos Ambientais)*. Coimbra.

DE CARTOGRAPHIE, C. F. (1970). Glossaire Francais de Cartographie. *Bulletin du CFC Fascicule N°46-Décembre*.

Références bibliographiques

De Vente, J., Poesen, J., & Verstraeten, G. (2005). The application of semi-quantitative methods and reservoir sedimentation rates for the prediction of basin sediment yield in Spain. *Journal of Hydrology*, 305(1-4), 63-86. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.030>

Ding, L., Chen, K.-l., Cheng, S.-g., & Wang, X. (2015). Water ecological carrying capacity of urban lakes in the context of rapid urbanization: A case study of East Lake in Wuhan. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts a/B/C*, 89, 104-113. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pce.2015.08.004>

Ding, Z., Nguyen, H., Bui, X.-N., Zhou, J., & Moayedi, H. (2020). Computational intelligence model for estimating intensity of blast-induced ground vibration in a mine based on imperialist competitive and extreme gradient boosting algorithms. *Natural Resources Research*, 29, 751-769. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11053-019-09548-8>

Djoukbala, O., Hasbaia, M., Benselama, O., Hamouda, B., Djerbouai, S., & Ferhati, A. (2022). Water Erosion and Sediment Transport in an Ungauged Semiarid Area: The Case of Hodna Basin in Algeria. *Wadi Flash Floods: Challenges and Advanced Approaches for Disaster Risk Reduction*, 439-454. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1007/978-981-16-2904-4_17

Du, G.-l., Zhang, Y.-s., Iqbal, J., Yang, Z.-h., & Yao, X. (2017). Landslide susceptibility mapping using an integrated model of information value method and logistic regression in the Bailongjiang watershed, Gansu Province, China. *Journal of Mountain Science*, 14, 249-268. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11629-016-4126-9>

Duman, T. Y., Çan, T., Emre, Ö., Keçer, M., Doğan, A., Ateş, Ş., & Durmaz, S. (2005). Landslide inventory of northwestern Anatolia, Turkey. *Engineering geology*, 77(1-2), 99-114. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.08.005>

Ekern, P. C. (1951). Raindrop impact as the force initiating soil erosion. *Soil Science Society of America Journal*, 15(C), 7-10. <https://doi.org/https://doi.org/10.2136/sssaj1951.036159950015000C0002x>

Ellison, W. (1944). Studies of raindrop erosion. *Agricultural Engineering*, 25(4), 131-136.

Références bibliographiques

El-Shayeb, Y. (1999). Apport à la logique floue à l'évaluation de l'aléa "Mouvement de Terrain des sites géotechniques": propositions pour une méthodologie générale. *Institut National Polytechnique de Lorraine, Ecole des mines de Nancy*.

EMBERGER, L. (1964). _ Notice explicative de la carte géologique au 1/200.000 e. 7 me. *Bou Saada. Serv., Géol. de l'Algérie. Alger*.

Ersi. (2022, 09-02-2022). www.esrifrance.fr

Faye, C. (2018). Caractérisation d'un bassin versant par l'analyse statistique des paramètres morphométriques: cas du bassin versant de la Gambie.(bassin continental Guineo-Sénégalais). <http://rivieresdusud.uasz.sn/xmlui/handle/123456789/324>

Fox, D. M., & Bryan, R. B. (2000). The relationship of soil loss by interrill erosion to slope gradient. *Catena*, 38(3), 211-222. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(99\)00072-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0341-8162(99)00072-7)

Friedman, J. H. (2001). Greedy function approximation: a gradient boosting machine. *Annals of statistics*, 1189-1232. <https://www.jstor.org/stable/2699986>

Friedman, J. H. (2002). Stochastic gradient boosting. *Computational statistics & data analysis*, 38(4), 367-378. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0167-9473\(01\)00065-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0167-9473(01)00065-2)

Friedman, J., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2000). Additive logistic regression: a statistical view of boosting (with discussion and a rejoinder by the authors). *The annals of statistics*, 28(2), 337-407. <https://doi.org/10.1214/aos/1016218223>

Gajowniczek, K., Ząbkowski, T., & Szupiluk, R. (2014). ESTIMATING THE ROC CURVE AND ITS SIGNIFICANCE FOR CLASSIFICATION MODELS'ASSESSMENT. *Metody Ilościowe w Badaniach Ekonomicznych*, 15(2), 382-391. <https://www.ceeol.com/search/article-detail?id=472340>

Galdino, S., Sano, E. E., Andrade, R. G., Grego, C. R., Nogueira, S. F., Bragantini, C., & Flosi, A. H. (2016). Large-scale modeling of soil erosion with RUSLE for conservationist planning of degraded cultivated Brazilian pastures. *Land Degradation & Development*, 27(3), 773-784. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/ldr.2414>

Gavrilovic, S. (1976). Bujicni tokovi i erozija (Torrents and erosion). *Beograd, Serbia, Gradevinski Kalendar*.

Références bibliographiques

Gayen, A., Pourghasemi, H. R., Saha, S., Keesstra, S., & Bai, S. (2019). Gully erosion susceptibility assessment and management of hazard-prone areas in India using different machine learning algorithms. *Science of the total environment*, 668, 124-138. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.436>

Georges, Y. (2008). Evaluation de l'érosion dans le Bassin versant de la rivière Grise (Haïti). *Master en gestion des Risques Naturels-Faculté universitaire des sciences agronomiques de Gembloux, Belgique*.

Giménez, R., & Govers, G. (2002). Flow detachment by concentrated flow on smooth and irregular beds. *Soil Science Society of America Journal*, 66(5), 1475-1483. <https://doi.org/https://doi.org/10.2136/sssaj2002.1475>

Golestani, G., Issazadeh, L., & Serajamani, R. (2014). Lithology effects on gully erosion in Ghoori chay Watershed using RS & GIS. *Int. J. Biosci*, 4(2), 71-76. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.12692/ijb/4.2.71-76>

Gómez-Gutiérrez, Á., Conoscenti, C., Angileri, S. E., Rotigliano, E., & Schnabel, S. (2015). Using topographical attributes to evaluate gully erosion proneness (susceptibility) in two mediterranean basins: Advantages and limitations. *Natural hazards*, 79, 291-314. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11069-015-1703-0>

Gorsevski, P. V., Gessler, P., & Foltz, R. B. (2000). Spatial prediction of landslide hazard using logistic regression and GIS. 4th International Conference on Integrating GIS and Environmental Modeling (GIS/EM4),

Govers, G. (1987). Spatial and temporal variability in rill development processes at the Huldenberg experimental site. *Catena supplement*(8), 17-34. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19881917176>

<https://www.researchgate.net/publication/233426006>

Govers, G., Takken, I., & Helming, K. (2000). Soil roughness and overland flow. *Agronomie*, 20(2), 131-146. <https://doi.org/https://dx.doi.org/10.1051/agro:2000114>

Griesbach, J., Ruiz Sinoga, J., Giordano, A., Berney, O., Gallart, F., Rojo Serrano, L., & Pavasovic, A. (1997). Guidelines for mapping and measurement of rainfall-induced erosion processes in the Mediterranean coastal areas. <https://www.researchgate.net/publication/256344700>

Références bibliographiques

GUERSAS, I. (2016). *Etude de la distribution statistique des pluies du bassin versant k'sob* Université Mohamed Boudiaf-M'sila]. <http://dspace.univ-msila.dz:8080/xmlui/handle/123456789/1263>

Gyssels, G., Poesen, J., Bochet, E., & Li, Y. (2005). Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: a review. *Progress in physical geography*, 29(2), 189-217. <https://doi.org/https://doi.org/10.1191/0309133305pp443ra>

Hadjadj, Z. (2020). Modélisation des flux hydro-sédimentaires et cartographie des zones à risque d'érosion hydrique par SIG (application au sous bassin du barrage oued cherf (Nord-est algerien). <http://dspace.univ-guelma.dz:8080/xmlui/handle/123456789/10104>

Hadji, R., Achour, Y., & Hamed, Y. (2018). Using GIS and RS for slope movement susceptibility mapping: comparing AHP, LI and LR methods for the Oued Mellah Basin, NE Algeria. Recent Advances in Environmental Science from the Euro-Mediterranean and Surrounding Regions: Proceedings of Euro-Mediterranean Conference for Environmental Integration (EMCEI-1), Tunisia 2017,

Hadji, R., Limani, Y., & Demdoug, A. (2014). Using multivariate approach and GIS applications to predict slope instability hazard case study of Machrouha municipality, NE Algeria. 2014 1st international conference on information and communication technologies for disaster Management (ICT-DM),

He, S., Wu, J., Wang, D., & He, X. (2022). Predictive modeling of groundwater nitrate pollution and evaluating its main impact factors using random forest. *Chemosphere*, 290, 133388. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133388>

Hedjazi, A. (2009). Quantification des apports liquides et solides de l'Oued El-ham. *Mémoire d'ingénieur d'état en hydraulique: option hydraulique urbaine, Université de M'Sila.*

Références bibliographiques

Heusch, B. (1970). L'érosion du pré-Rif. Une étude quantitative de l'érosion hydraulique dans les collines marneuses du pré-Rif occidental. <http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=PASCALGEODEBRGM732266134>

http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers15-11/010056569.pdf

<http://horizon.documentation.ird.fr/exl-php/cadcgp.php?CMD=CHERCHE&query=1&MODELE=vues/horizon/accueil.html&AUTH=1>

Heusch, B. (1988). Aménagement d'un Terroir: Techniques de Lutte Contre le Ravinement. *CNEARC: Montpellier*.

Hjulström, F. (1935). *Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the River Fyris* The Geological institution of the University of Upsala]. <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1687693&dswid=-3869>

<https://urn.kb.se/resolve?urn=urn%3Anbn%3Ase%3Auu%3Adiva-481786><https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1687693>

Julião, R. P., Nery, F., Ribeiro, J. L., Castelo Branco, M., & Zêzere, J. (2009). Guia metodológico para a produção de cartografia municipal de risco e para a criação de sistemas de informação geográfica (SIG) de base municipal. In: Autoridade Nacional de Protecção Civil.

Kauark Leite, L. A. (1990). *Réflexions sur l'utilité des modèles mathématiques dans la gestion de la pollution diffuse d'origine agricole* Marne-la-vallée, ENPC]. <https://hal.science/tel-00529963/>

Kebiche, M. (1994). Le bassin versant du Hodna (Algérie): Ressources en eau et possibilités d'aménagement. *Travaux de l'Institut de Géographie de Reims*, 85(1), 25-34. <https://doi.org/https://doi.org/10.3406/tigr.1994.1298>

Khosravi, K., Shahabi, H., Pham, B. T., Adamowski, J., Shirzadi, A., Pradhan, B., Dou, J., Ly, H.-B., Gróf, G., & Ho, H. L. (2019). A comparative assessment of flood susceptibility modeling using multi-criteria decision-making analysis and machine learning methods. *Journal of Hydrology*, 573, 311-323. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.03.073>

Références bibliographiques

KHOUDOUR, D., ZEDAM, A., & BENSEFIA, S. (2021). Using cartographic documents and GIS for creation a hydrodatabase in the Hodna basin-Algeria. *African Journal of Land Policy and Geospatial Sciences*, 4(4), 499-516. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.22004/ag.econ.334453>

L, B. (1997). *Évaluation et contrôle des problèmes d'érosion des sols en milieu montagneux et analyse des risques d'érosion : Étude de cas : Le Mont-Tremblant*.

Le Bissonnais, Y., Renaux, B., & Delouche, H. (1995). Interactions between soil properties and moisture content in crust formation, runoff and interrill erosion from tilled loess soils. *Catena*, 25(1-4), 33-46. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0341-8162\(94\)00040-L](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0341-8162(94)00040-L)

Le Bissonnais, Y., Thorette, J., Bardet, C., & Daroussin, J. (2002). L'érosion hydrique des sols en France. *Rapport INRA-IFEN*. https://www.researchgate.net/publication/266884294_L%27erosion_hydrique_des_sols_en_France?enrichId=rgreq-56923f208bb849fcf8554c22567db0ca-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzI2Njg4NDI5NDtBUzoxNTYyMTAyMTcwOTkyNjRAMTQxNDI1NDgyNjcwNg%3D%3D&el=1_x_2&_esc=publicationCoverPdf

Leguédois, S. (2003). *Mécanismes de l'érosion diffuse des sols. Modélisation du transfert et de l'évolution granulométrique des fragments de terre érodés* [Université d'Orléans]. <https://theses.hal.science/tel-00516390/>

Leroi, E. (1996). Landslide hazard-risk maps at different scales: objectives, tools and developments. *Landslides*,

Loh, W. Y. (2011). Classification and regression trees. *Wiley interdisciplinary reviews: data mining and knowledge discovery*, 1(1), 14-23. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/widm.8>

Lu, D., Li, G., Valladares, G. S., & Batistella, M. (2004). Mapping soil erosion risk in Rondonia, Brazilian Amazonia: using RUSLE, remote sensing and GIS. *Land Degradation & Development*, 15(5), 499-512. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/ldr.634>

MAAMAR KOUADRI, K. (2019). *Développement d'outils spatiaux et cartographie des risques d'érosion hydrique des sols dans le Tell Oranais*. Université de Mostaganem-Abdelhamid Ibn Badis.]. <http://e-biblio.univ-mosta.dz/handle/123456789/11482>

Références bibliographiques

Marref, N. (2013). *Apprentissage incrémental & machines à vecteurs supports* Université de Batna 2]. <http://eprints.univ-batna2.dz/id/eprint/624>

McCool, D., Foster, G., Renard, K., Yoder, D., & Weesies, G. (1995). The revised universal soil loss equation. Department of Defense. Interagency Workshop on Technologies to Address Soil Erosion on Department of Defense Lands San Antonio, TX,

Mechri, B. e. (2008). *Contribution à l'étude du transport solide dans le sous bassin versant de Soubella (Hodna)*. Université de M'sila.].

MEGHRAOUI, M. (2019). *Analyse Spatio-temporelle de l'érosion dans Les Monts de Sabaa Chioukh (Nord-ouest Algérien): Recherche des facteurs conditionnels* Université de Tlemcen-Abou Bekr Belkaid].

Meghraoui, M., Habi, M., Morsli, B., Regagba, M., & Seladji, A. (2017). Mapping of soil erodibility and assessment of soil losses using the RUSLE model in the Sebaa Chioukh Mountains (northwest of Algeria). *Journal of Water and Land Development*, 34(1), 205. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1515/jwld-2017-0055>

Merghadi, A., Abderrahmane, B., & Tien Bui, D. (2018). Landslide susceptibility assessment at Mila Basin (Algeria): a comparative assessment of prediction capability of advanced machine learning methods. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(7), 268. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ijgi7070268>

Miclet, C. A. L., & CornuØjols, A. (2010). *Apprentissage Artificiel. Concepts et algorithms, 2e edition*, Eyrolles.

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. *Applied Geomatics*, 12(2), 179-191. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s12518-019-00289-0>

Milanović, S., Marković, N., Pamučar, D., Gigović, L., Kostić, P., & Milanović, S. D. (2020). Forest fire probability mapping in eastern Serbia: Logistic regression versus random forest method. *Forests*, 12(1), 5. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/f12010005>

Références bibliographiques

Minea, G., Mititelu-Ionuș, O., Gyasi-Agyei, Y., Ciobotaru, N., & Rodrigo-Comino, J. (2022). Impacts of grazing by small ruminants on hillslope hydrological processes: A review of European current understanding. *Water Resources Research*, 58(3), e2021WR030716. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2021WR030716>

Moeyersons, J. (1989). "Nature of erosion of sloping land in Rwanda."

Montanarella, L., Badraoui, M., Chude, V., Baptista Costa, I. D. S., Mamo, T., Yemefack, M., Singh Aulakh, M., Yagi, K., Young Hong, S., & Vijarnsorn, P. (2015). Status of the world's soil resources Main Report. <https://hdl.handle.net/10669/78011>

<http://www.fao.org/family-farming/detail/es/c/357394/>

Moore, I. D., Grayson, R., & Ladson, A. (1991). Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological processes*, 5(1), 3-30. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/hyp.3360050103>

Morsli, B., Mazour, M., Mededjel, N., Hamoudi, A., & Roose, E. (2004). Impact of land use on runoff and erosion risks in the semiarid hillslopes of North Western Algeria. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 15(1), 96-104. https://www.jle.com/en/revues/sec/e-docs/influence_de_lutilisation_des_terres_sur_les_risques_de_ruissellement_et_derosion_sur_les_versants_semiarides_du_nordoues_262278/article.phtml?cle_doc=00040086

Moss, A., Walker, P., & Hutka, J. (1980). Movement of loose, sandy detritus by shallow water flows: an experimental study. *Sedimentary Geology*, 25(1-2), 43-66. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0037-0738\(80\)90053-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0037-0738(80)90053-6)

Naghibi, S. A., Pourghasemi, H. R., & Dixon, B. (2016). GIS-based groundwater potential mapping using boosted regression tree, classification and regression tree, and random forest machine learning models in Iran. *Environmental monitoring and assessment*, 188, 1-27. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10661-015-5049-6>

Nhu, V.-H., Janizadeh, S., Avand, M., Chen, W., Farzin, M., Omidvar, E., Shirzadi, A., Shahabi, H., J. Clague, J., & Jaafari, A. (2020). GIS-based gully erosion susceptibility mapping: a comparison of computational ensemble data mining models. *Applied Sciences*, 10(6), 2039. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/app10062039>

Nicu, I. C. (2018). Is overgrazing really influencing soil erosion? *Water*, 10(8), 1077. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/w10081077>

Références bibliographiques

Nord, G. (2006). *Modélisation à base physique des processus de l'érosion hydrique à l'échelle de la parcelle* Université Joseph-Fourier-Grenoble IJ. <https://theses.hal.science/tel-00111955/>

Notices explicatives des cartes géologiques 1/50000 (Bourj Bou Arreridj, Ain Taghrout, Maadid, Ras El Oued). In.

Ouvry, J.-F. (1990). Effet des techniques culturales sur la susceptibilité des terrains à l'érosion par ruissellement concentré. Expérience du Pays de Caux (France). *Cahiers ORSTOM, série pédologie*, 25(1-2), 157-169.

Patton, P. C., & Schumm, S. A. (1975). Gully erosion, Northwestern Colorado: a threshold phenomenon. *Geology*, 3(2), 88-90. [https://doi.org/https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1975\)3%3C88:GENCAT%3E2.0.CO;2](https://doi.org/https://doi.org/10.1130/0091-7613(1975)3%3C88:GENCAT%3E2.0.CO;2)

Peucker, T., Fowler, R., Little, J., & Mark, D. (1978). The Triangulated Irregular Network: Proceedings of the Digital Terrain Models (DTM) Symposium. *American Society of Photogrammetry*, 516-540.

Pham, Q. B., Achour, Y., Ali, S. A., Parvin, F., Vojtek, M., Vojteková, J., Al-Ansari, N., Achu, A., Costache, R., & Khedher, K. M. (2021). A comparison among fuzzy multi-criteria decision making, bivariate, multivariate and machine learning models in landslide susceptibility mapping. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 12(1), 1741-1777. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/19475705.2021.1944330>

Pham, Q. B., Mukherjee, K., Norouzi, A., Linh, N. T. T., Janizadeh, S., Ahmadi, K., Cerdà, A., Doan, T. N. C., & Anh, D. T. (2020). Head-cut gully erosion susceptibility modelling based on ensemble Random Forest with oblique decision trees in Fareghan watershed, Iran. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 11(1), 2385-2410. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/19475705.2020.1837968>

Poesen, J. (1985). An improved splash transport model. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 29(2).

Poesen, J., & Govers, G. (1990). Gully erosion in the loam belt of Belgium: typology and control measures. Soil erosion on agricultural land. Proceedings of a workshop sponsored by the British Geomorphological Research Group, Coventry, UK, January 1989.,

Références bibliographiques

Poiraud, A. (2014). Landslide susceptibility–certainty mapping by a multi-method approach: A case study in the Tertiary basin of Puy-en-Velay (Massif central, France). *Geomorphology*, 216, 208-224. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.04.001>

Pourghasemi, H. R., & Kerle, N. (2016). Random forests and evidential belief function-based landslide susceptibility assessment in Western Mazandaran Province, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 75, 1-17. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s12665-015-4950-1>

Pourghasemi, H. R., & Rahmati, O. (2018). Prediction of the landslide susceptibility: Which algorithm, which precision? *Catena*, 162, 177-192. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.11.022>

Pourghasemi, H. R., Sadhasivam, N., Kariminejad, N., & Collins, A. L. (2020). Gully erosion spatial modelling: Role of machine learning algorithms in selection of the best controlling factors and modelling process. *Geoscience Frontiers*, 11(6), 2207-2219. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.03.005>

Pourghasemi, H. R., Yousefi, S., Kornejady, A., & Cerdà, A. (2017). Performance assessment of individual and ensemble data-mining techniques for gully erosion modeling. *Science of the total environment*, 609, 764-775. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.198>

Qin, C.-Z., Zhu, A.-X., Pei, T., Li, B.-L., Scholten, T., Behrens, T., & Zhou, C.-H. (2011). An approach to computing topographic wetness index based on maximum downslope gradient. *Precision agriculture*, 12, 32-43. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11119-009-9152-y>

Rachman, A., Anderson, S., Gantzer, C., & Thompson, A. (2003). Influence of long-term cropping systems on soil physical properties related to soil erodibility. *Soil Science Society of America Journal*, 67(2), 637-644. <https://doi.org/https://doi.org/10.2136/sssaj2003.6370>

Rahmati, O., Haghizadeh, A., Pourghasemi, H. R., & Noormohamadi, F. (2016). Gully erosion susceptibility mapping: the role of GIS-based bivariate statistical models and their comparison. *Natural hazards*, 82, 1231-1258. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11069-016-2239-7>

Références bibliographiques

Ramos, A., Cunha, L., & Cunha, P. P. (2014). Application de la Méthode de l'Analyse Multicritère Hiérarchique à l'étude des glissements de terrain dans la région littorale du centre du Portugal: Figueira da Foz–Nazaré. *Geo-Eco-Trop*, 38(1), 33-44.

Riezebos, H. T., & Epema, G. F. (1985). Drop shape and erosivity part II: Splash detachment, transport and erosivity indices. *Earth Surface Processes and Landforms*, 10(1), 69-74. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/esp.3290100109>

Roche, M. (1963). Hydrologie de surface. (*No Title*). <https://doi.org/10.1126/science.140.3567.659>

Rodriguez-Galiano, V., Mendes, M. P., Garcia-Soldado, M. J., Chica-Olmo, M., & Ribeiro, L. (2014). Predictive modeling of groundwater nitrate pollution using Random Forest and multisource variables related to intrinsic and specific vulnerability: A case study in an agricultural setting (Southern Spain). *Science of the total environment*, 476, 189-206. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.01.001>

Roose, E. (1977). Use of the universal soil loss equation to predict erosion in West Africa. In *Soil erosion: prediction and control* (Vol. 21, pp. 60-74). Soil Conservation Society of America Ankeny, Iowa. <https://core.ac.uk/reader/39881180>

Roose, E. (1984). Causes et facteurs de l'érosion hydrique sous climat tropical: conséquences sur les méthodes antiérosives. *Machinisme Agricole Tropical*, 87, 4-18. <https://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:17180>

Roose, E. (1987). Gestion conservatoire des eaux et de la fertilité des sols dans les paysages soudano-sahéliens de l'Afrique Occidentale. Proceedings of an International Workshop,

Roose, E. (1994). *Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES)* (Vol. 70). Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture.

Roy, P., Chakraborty, R., Chowdhuri, I., Malik, S., Das, B., & Pal, S. C. (2020). Development of different machine learning ensemble classifier for gully erosion susceptibility in Gandheswari Watershed of West Bengal, India. *Machine learning for intelligent decision science*, 1-26. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-981-15-3689-2_1

Références bibliographiques

Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. McGraw, New York.

Sabir, M. (1987). L'érosion hydrique et sa quantification. *Mémoire de DEA Hydrologie et Géochimie Isotopique, Université de Paris, 11, 300*.
<https://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010055512>

Saha, S., Gayen, A., Pourghasemi, H. R., & Tiefenbacher, J. P. (2019). Identification of soil erosion-susceptible areas using fuzzy logic and analytical hierarchy process modeling in an agricultural watershed of Burdwan district, India. *Environmental Earth Sciences, 78*, 1-18.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s12665-019-8658-5>

Saha, S., Roy, J., Arabameri, A., Blaschke, T., & Tien Bui, D. (2020). Machine learning-based gully erosion susceptibility mapping: A case study of Eastern India. *Sensors, 20*(5), 1313.
<https://doi.org/https://doi.org/10.3390/s20051313>

Samanta, R. K., Bhunia, G. S., & Shit, P. K. (2016). Spatial modelling of soil erosion susceptibility mapping in lower basin of Subarnarekha river (India) based on geospatial techniques. *Modeling Earth Systems and Environment, 2*, 1-13.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s40808-016-0170-2>

Sara, Z. (2016). *Etude de la sensibilité du sous bassin versant de Ksob a l'érosion hydrique par une approche quantitative* UNIVERSITE DE MOHAMED BOUDIAF M'SILA FACULTE DE TECHNOLOGIE]. <http://dspace.univ-msila.dz:8080/xmlui/handle/123456789/3094>

Savornin, J. (1920). *Etude géologique de la région du Hodna et du plateau sétifien*. Ancienne maison bastide-Jourdan, Jules carbonel, imprimeur-libraire de l

Soeters, R., & Van Westen, C. (1996). Slope instability recognition, analysis and zonation. *Landslides: investigation and mitigation, 247*, 129-177.
<https://www.researchgate.net/publication/209803184>

Souchère, V., King, D., Daroussin, J., Papy, F., & Capillon, A. (1998). Effects of tillage on runoff directions: consequences on runoff contributing area within agricultural catchments. *Journal of Hydrology, 206*(3-4), 256-267. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00103-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00103-6)

Références bibliographiques

Stone, R. P., & Hilborn, D. (2000). *Equation universelle des pertes en terre (USLE)*. Ministère de l'agriculture, de l'alimentation et des affaires rurales. <https://docplayer.fr/19852677-Equation-universelle-des-pertes-en-terre-usle-r-p-stone-et-d-hilborn.html>

Tamene, L., & Vlek, P. (2007). Assessing the potential of changing land use for reducing soil erosion and sediment yield of catchments: a case study in the highlands of northern Ethiopia. *Soil Use and Management*, 23(1), 82-91. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2006.00066.x>

Tani, K., & Abdesslem, H. (2019). *Estimation et modélisation des transports solides, Utilisation du SIG pour la cartographie des zones à risques d'érosion hydrique: application au bassin du barrage du Mefrouche (Nord-ouest algérien)* Université de Tlemcen-Abou Bekr Belkaid]. <http://dspace.univ-tlemcen.dz/handle/112/15055>

Temple, P. H., & Rapp, A. (1972). Landslides in the Mgeta area, Western Uluguru mountains, Tanzania: Geomorphological effects of sudden heavy rainfall. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 54(3-4), 157-193. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/04353676.1972.11879864>

TENG, H.-f., Jie, H., Yue, Z., ZHOU, L.-q., & Zhou, S. (2019). Modelling and mapping soil erosion potential in China. *Journal of integrative agriculture*, 18(2), 251-264. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(18\)62045-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S2095-3119(18)62045-3)

Thierry, Y. (2007). *Susceptibilité du Bassin de Barcelonnette (Alpes du Sud, France) aux mouvements de versant': cartographie morphodynamique, analyse spatiale et modélisation probabiliste* Université de Caen]. <https://hal.univ-brest.fr/tel-00259135v2>

Touaibia, B. (2004). Manuel pratique d'hydrologie. In.

Toumi, S., Meddi, M., Mahé, G., & Brou, Y. T. (2013). Cartographie de l'érosion dans le bassin versant de l'Oued Mina en Algérie par télédétection et SIG. *Hydrological sciences journal*, 58(7), 1542-1558. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/02626667.2013.824088>

Umar, Z., Pradhan, B., Ahmad, A., Jebur, M. N., & Tehrany, M. S. (2014). Earthquake induced landslide susceptibility mapping using an integrated ensemble frequency ratio and logistic regression models in West Sumatera Province, Indonesia. *Catena*, 118, 124-135. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.02.005>

Références bibliographiques

UNDRO, N. D. (1979). Vulnerability Analysis: Report of Expert Group Meeting. *Office of the United Nations Disaster Relief Coordinator, Geneva*, 9-12. <https://digitallibrary.un.org/record/95986?ln=en>

Vaezi, A., Sadeghi, S., Bahrami, H., & Mahdian, M. (2008). Modeling the USLE K-factor for calcareous soils in northwestern Iran. *Geomorphology*, 97(3-4), 414-423. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.08.017>

Van Westen, C. J. (2000). The modelling of landslide hazards using GIS. *Surveys in geophysics*, 21(2-3), 241-255. <https://doi.org/https://doi.org/10.1023/A:1006794127521>

Van Westen, C., Rengers, N., & Soeters, R. (2003). Use of geomorphological information in indirect landslide susceptibility assessment. *Natural hazards*, 30, 399-419. <https://doi.org/https://doi.org/10.1023/B:NHAZ.0000007097.42735.9e>

Vincent, G. (2012). Introduction à la programmation en R. *École d'actuariat, Université Laval*, 151.

Wang, F., Sahana, M., Pahlevanzadeh, B., Pal, S. C., Shit, P. K., Piran, M. J., Janizadeh, S., Band, S. S., & Mosavi, A. (2021). Applying different resampling strategies in machine learning models to predict head-cut gully erosion susceptibility. *Alexandria Engineering Journal*, 60(6), 5813-5829. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.04.026>

Wang, L., Wei, S., & Horton, R. (2011). Effects of vegetation and slope aspect on water budget in the hill and gully region of the Loess Plateau of China. *Catena*, 87(1), 90-100. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.05.010>

Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning*. Department of Agriculture, Science and Education Administration. https://books.google.dz/books?hl=en&lr=&id=rRAUAAAAYAAJ&oi=fnd&pg=PA5&dq=Predicting+rainfall+erosion+losses:+a+guide+to+conservation+planning&ots=cvtosUmvSY&sig=WUaLo7RTL0JqmZ75p_TXJj0Bs68&redir_esc=y#v=onepage&q=Predicting%20rainfall%20erosion%20losses%3A%20a%20guide%20to%20conservation%20planning&f=false

Wright, M. N., & Ziegler, A. (2015). ranger: A fast implementation of random forests for high dimensional data in C++ and R. *arXiv preprint arXiv:1508.04409*. <https://doi.org/https://doi.org/10.48550/arXiv.1508.04409>

Références bibliographiques

Yalin, M. S. (1972). Mechanics of sediment transport. (*No Title*).
<https://lccn.loc.gov/76024869>

Yang, A., Wang, C., Pang, G., Long, Y., Wang, L., Cruse, R. M., & Yang, Q. (2021). Gully erosion susceptibility mapping in highly complex terrain using machine learning models. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(10), 680.
<https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ijgi10100680>

Yesilnacar, E., & Topal, T. (2005). Landslide susceptibility mapping: a comparison of logistic regression and neural networks methods in a medium scale study, Hendek region (Turkey). *Engineering geology*, 79(3-4), 251-266.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2005.02.002>

Zadeh, L. A. (1965). *Fuzzy set theory and its applications* Dordrecht,.

Zimmermann, H.-J., & Zysno, P. (1980). Latent connectives in human decision making. *Fuzzy sets and systems*, 4(1), 37-51. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0165-0114\(80\)90062-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0165-0114(80)90062-7)

Annexes



Photographies



Photographies



Photographies





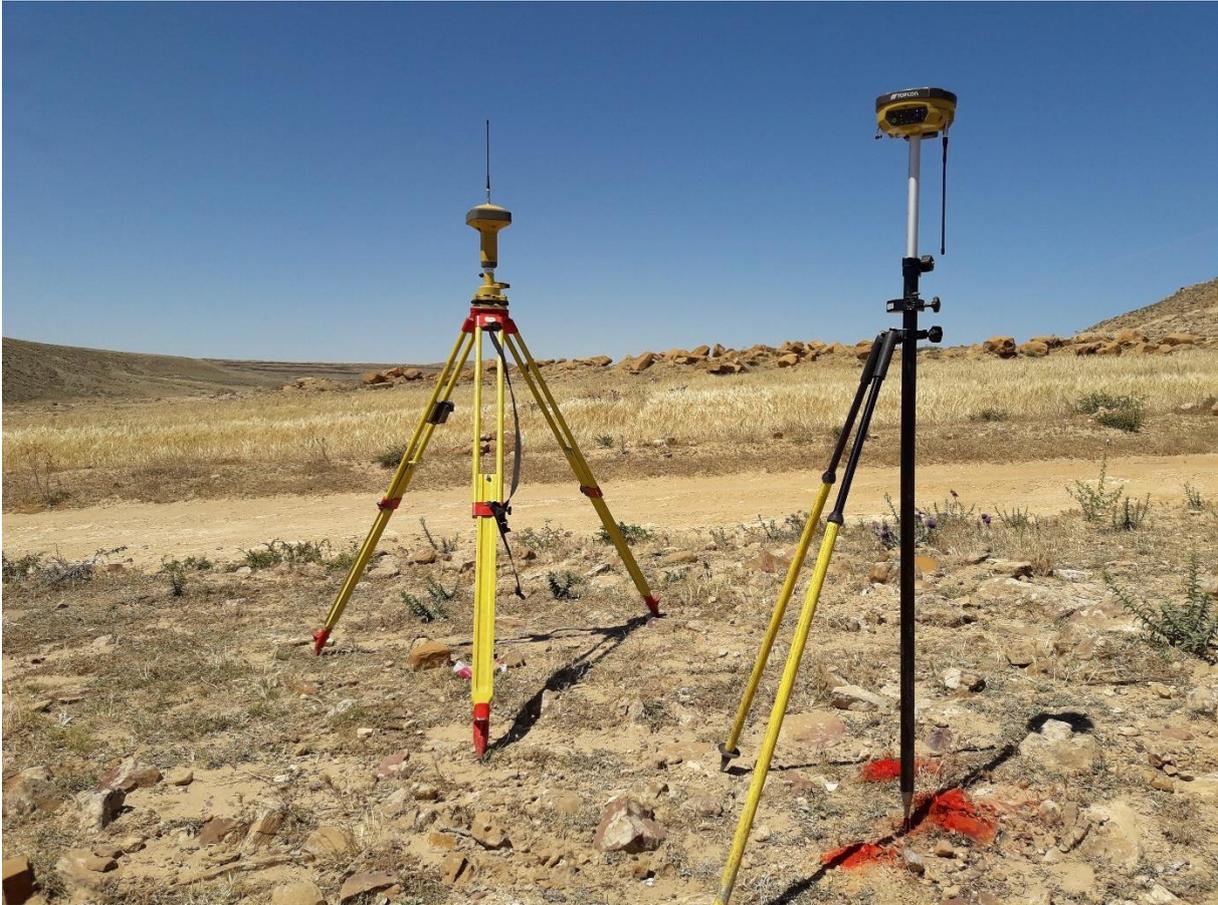
Photographies



Photographies



Photographies



Photographies





Designing gully erosion susceptibility maps (GESM) in the Algerian Eastern Tell: a case study of the K'sob River watershed

Ilhem Drid^{1,2} · Yacine Achour³ · Karim Zighmi¹ · Thamer Nouioua⁴ · Oussama Khababa³ · Samra Rahmani³ · Oumelkheir Ouadfel¹ · Bachir Atoui³

Received: 14 February 2022 / Accepted: 30 June 2022
© Saudi Society for Geosciences 2022

Abstract

Gully erosion is a pervasive problem which frequently develops in semi-arid environments. The objective of this study is to test the efficiency of three individual models for designing gully erosion susceptibility maps (GESM), to assess the performance of the generated models, and to explore the utility of these maps to help decision makers and local land users in the evaluation of land degradation. The K'sob watershed (1570 sq km) is an agricultural land with the most affected areas by soil erosion in the Algerian Eastern Tell, NE Algeria. The prevalence of alluvial terraces, clays, and marls in the area led to the development of very large gullies. The most significant consequences of this phenomenon are the silting up of the K'sob dam, the loss of agricultural lands, and the nonprotection of the watershed. To evaluate soil erosion by gully erosion in this watershed, random forest, extreme gradient boosting, and logistic regression models were applied. In the entire area, 565 (1475 gridded cells) gully erosion were identified by a hard field investigation. Eleven gully erosion-conditioning factors were selected and assessed to find the most susceptible areas to this hazard. Then, the performance of the applied models was assessed. Results show that the XGBoost model has the best performance (AUC = 0.942, Std. error = 0.009, and CI "0.893–0.971"). Requiring land users in the evaluation of land degradation can supply awareness into local degradation processes and could improve the local pertinence of indicators for investigating progress towards land degradation.

Keywords Gully erosion · Land degradation · GIS · Machine learning · K'sob River Watershed (Algeria)

Introduction

Soil erosion is one of the most hazardous phenomena in the world, resulting from the movement and transport of the topsoil by different driving forces, particularly water, wind,

and mass movement (Bouguerra et al. 2017a, b; Patil 2018; Rodrigo-Comino et al. 2021). It is ranked as the most popular problem of land degradation, covering not only agricultural land (Ahmad et al. 2020), but also grassland (Minea et al. 2022a) and forestland (Kavian et al. 2010). It has been known since ancient times and is related to natural and human factors that are difficult to control (Saha et al. 2019). Soil erosion is very active in arid and semi-arid regions and occurs when heavy rains fall in areas with low vegetation cover, poor soils, and with large slopes (Angileri et al. 2016). Water erosion is a crucial issue in Algeria, which seriously affects over 12 million hectares of cropland and pastures. Tellian zones are considered as being the one that has been most influenced by this phenomenon with a percentage of 41% (Benkadja et al. 2013). Among these areas, the K'sob River watershed faces a serious land degradation problem, characterized by huge losses in agricultural land in the upstream part.

Gully erosion is a greatly perceptible form of soil erosion that alters soil capacity, restrains land use, and can endanger roads and structures. Gullies are waterways with very steep

Responsible editor: Amjad Kallel

✉ Yacine Achour
y.achour@univ-bba.dz

- ¹ Department of Earth Sciences, Institute of Architecture and Earth Sciences, University of Ferhat Abbas, Setif, Algeria
- ² Research Unit On Emerging Materials (RUEM), Department of Civil Engineering, University of Ferhat Abbas, Setif, Algeria
- ³ Department of Civil Engineering, Bordj Bou Arreridj University, 34030 El Annasser, Algeria
- ⁴ Department of Civil Engineering, Beira Interior University, Av. Marques d'Avila Bolama, 6200-001 Covilhã, Portugal

sides, which experience temporary flows during excessive or prolonged rainfall. Monitoring gully erosion can be delicate and expensive. It may be justified on good quality of soils where there is a practical possibility of success or where a road or building is endangered by a gully. However, for areas of poor soils, this task becomes difficult and may be infeasible. For this reason, prevention is far better than control. Among the means that help us in the prevention from this phenomenon, there is gully erosion susceptibility maps (GESM), which is one basic method for managing gully erosion to achieve sustainable development (Arabameri et al. 2019a). The United Nations (UN) has approved the Sustainable Development Goals (SDGs), containing target 15.3. These later need three effective approaches for managing soils: remote sensing, field studies, and modeling (Achour et al. 2021). Therefore, GESM is a very vital task for the planner in land use. They have to look for nature-based solutions (NBSs) for the protection and restoration of land, which is a strategic method to enhance the quality of life of the public and preserve their environment (Keesstra et al. 2018). They must also look for efficient and quick methods to solve such problems (Escobedo et al. 2019). NBSs, a cost-effective long-term solution, may help policymakers find solutions for this kind of risk and land degradation in their domains of competence (Achour et al. 2021). Several investigators such as Lugato et al. (2018), Tan et al. (2020), and Ur Rehman et al. (2021) approve the idea that soil erosion induces more carbon being sequestered from the atmosphere. However, a recent study performed by Minea et al. (2022b) in a temperate climate to assess grazing impact (sheep and goats) on land degradation processes built an artificial intelligence index and shows that the same approach can be used as a tool to assess and predict areas susceptible to land degradation.

Recent advances focused on utilizing statistical approaches or machine learning algorithms to develop comprehensive models for susceptibility and hazard assessment. For landslide susceptibility, several researchers worldwide have used different methods, such as frequency ratio (Rahaman et al. 2021; Shano et al. 2021), logistic regression (Achour et al. 2018; Hadji et al. 2018), artificial neural networks (Gameiro et al. 2021; Jones et al. 2021), and analytic hierarchy process (Achour et al. 2017; Panchal and Shrivastava 2022). Many studies about the distribution and evolution of gullies appeared in the literature (Castillo and Gómez 2016; Pourghasemi et al. 2017; Vanmaercke et al. 2021). Also, studies about the semi-automatic and automatic mapping of gullies (Wang et al. 2020), those elaborated using drones (Eugenia et al. 2017; Carabassa et al. 2021). Currently, different methods are adopted to construct GESMs. They include logistic regression (Conoscenti et al. 2014; Hembram et al. 2019; Roy et al. 2020), support vector machine (Gayen et al. 2019; Tien Bui et al. 2019), random forests (Shruthi et al. 2014; Arabameri et al. 2019b; Chowdhuri et al. 2020), boosted regression trees (Arabameri et al. 2019c),

naive bayes (Al-Bawi et al. 2021; Hembram et al. 2021), neural networks (Rahmati et al. 2017; Razavi-Termeh et al. 2020), and extreme gradient boosting (Chen et al. 2021; Yang et al. 2021).

In Algeria, a specific soil loss of up to 4000 t/km²/year is quantified by specialists (Djoukbala et al. 2022). This amount is mainly represented by soils that are fertile, resulting in low agricultural productivity and degradation of the environment. This makes Algeria one of the most vulnerable regions to flooding and most exposed to erosive water conditions (Boudani et al. 2020). Several investigations have been carried out to assess the processes of erosion and sediment transport in different areas of the country (Hasbaia et al. 2012; Bouchelkia et al. 2014; Selmi and Khanchoul 2016; Balla et al. 2017; Bouguerra et al. 2017a, b; Belarbi et al. 2018; Benselama et al. 2019). They showed that the phenomenon is highly evolved in any of their study areas. All of these areas are characterized by relatively high sediment transport rates. Mihi et al. (2020) carried out a quantitative estimation of soil erosion in the Tebessa region using USLE/RUSLE model with GIS and analytic hierarchy process model. For the study area, the first article related to this issue is written by Benkadja et al. (2013). This article assessed soil loss and siltation of the hydrological system of the K'sob River watershed using direct and indirect methods.

The current study was carried out in the K'sob River watershed, NE Algeria. This basin is marked by a continental climate with a tendency to aridity (semi-arid). So far, no studies have been carried out in this study area to assess gully erosion or to give information about it. The objectives of this study specifically include the following: (1) to test the efficiency of three individual models for GESM; (2) to assess the performance of the modeled models and to validate them using the AUC, the std. error, and the confidence interval at 95%; (3) to explore the utility of these maps to help decision makers and local land users in the evaluation of land degradation. Most of the agricultural lands are degraded by certain factors. Among these factors, there is erosion. For restoring the land, it is important to manage all the factors properly. Mapping erosion susceptibility is an indispensable step prior to the implementation of any specific soil prevention, remediation and mitigation measures. These maps provide important information about this event to decision makers (e.g., the degree of susceptibility and its likely location), but do not describe the restoration procedures, which should be determined.

Study area

With an area of around 1570 km², the K'sob River watershed is located in the huge Hodna basin, NE Algeria. It extends in its large part in the territory of the Bordj Bou Arreridj District, while the remaining part, including its outlet, extends into the territory of the M'sila District (Fig. 1). The study

area was bounded by 04°28'37" to 05°10'00" E, longitudes and 35°43'27 " to 36°09'53" N, latitudes. This watershed is bordered by the Biban Mountains in the north, by the high plateaus of eastern Algeria in the east, and by the Hodna Chain in the south. The minimum altitude is around 478 m above sea level (a.s.l.) in the town of M'tarfa, in the south-eastern part of the watershed, and the maximum altitude is 1865 m (a.s.l.) in the south-east part near the cities of Maadid, Rabta, Ghilassa, Taglait, and Ras El Ouesd. The study area has a semi-arid climate (Benkadja et al. 2013; Djoukbala et al. 2022). From the database of the National Meteorological Office (ONM) of Algeria, the average precipitation per year is comprised of between 340 and 400 mm. June and July are the driest months in the year. The mean annual temperature is 15 °C. Sediment transport exhibits a high degree of variability during the season in the study area, influenced by the seasonal pattern of precipitation and basin characteristics. According to Benkadja et al. (2013), the suspended sediment load is highest in the autumn and summer.

The predominant lithological units are Miocene and Campanian formation. These are mainly located in the

northwest part of the study area. The Miocene formation is mostly sandy clays and yellow loaf marl, and the Campanian formation consists of gray marl. Maastrichtian marly limestones and gray marls are also distributed across the area. In its northern and northeastern part, the region also contains Quaternary formations characterized by the presence of old and recent alluvium and screes. From a geomorphological point of view, soil degradation is more advanced in the southern part of the K'sob River watershed, where the hydrographic network is more developed. The hydrological regime of the K'sob River is principally related to the precipitations (Zeroual et al. 2013). Surface runoff shows variability and depends on the rainfall patterns, with an inter-seasonal runoff of 0.9 m³ s⁻¹ (1973–2010), or an inter-seasonal yield of 28 h m⁻³ (Benkadja et al. 2013; Guesri et al. 2020). The K'sob River watershed falls into the inequilibrium stage of erosion (youthful stage). The youthful state of this watershed means that it is dynamic and active in terms of erosion, making it highly susceptible to erosion (Abdellah et al. 2018). Some morphometric characteristics of the K'sob River watershed are given in Table 1.

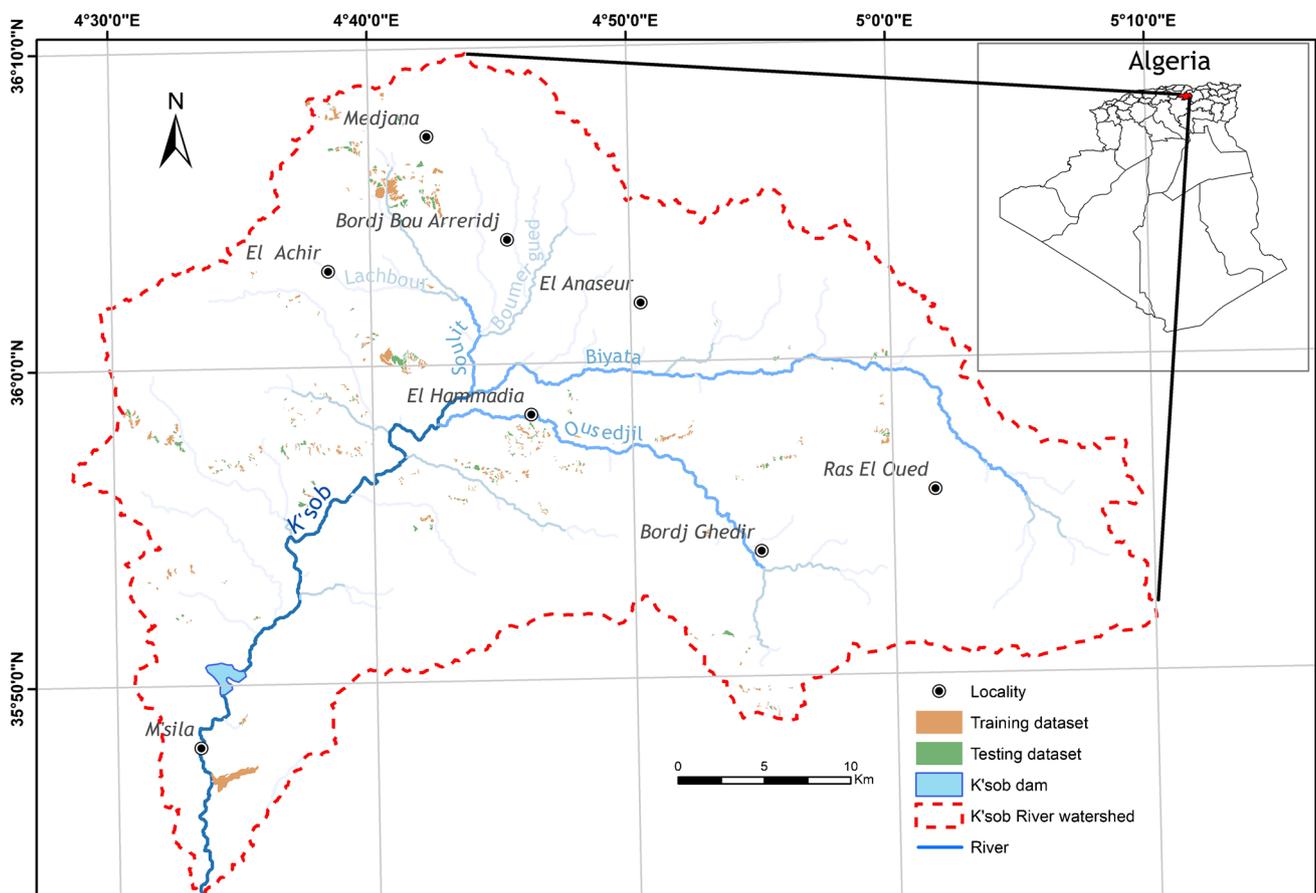


Fig. 1 Location map of the K'sob River watershed

Gully erosion is noteworthy in the study area due to its hydrological, topographic, and lithological settings. The relationship between gully erosion and the hydrology of watersheds has been studied by Gómez-Gutiérrez et al. (2012). They found that there is a significant relationship among the total net erosion-accumulation amount and hydrological parameters, such as total discharge and the number of times the peak flows exceeded certain values. They also showed that the strongest relationship was seen with the total amount of rainfall. Heavy rainfall produces water saturation of the sediments and reduces the cohesion of the channel banks, thus increasing its erodibility. Figure 2 shows some issues regarding this phenomenon, which is well distinguished.

Methodology

Data processing

The work procedures consisted of data collection in the field and data analysis (Fig. 3). The main steps to meet the main objectives of this study are:

- (1) Database preparation (gully erosion inventory map and predisposing factors);
- (2) Multicollinearity analysis;
- (3) GESM via RF, XGBoost, and LR: The spatial gully erosion mapping is considered as a binary classification in which the gully index is split into gully and non-gully classes. The value “1” is assigned to gully pixels

and the value “0” to non-gully pixels. Next, gully susceptibility index maps were created using the predicted values for each model unit by group. The results of the three algorithms were then exported to GIS. Finally, the Jenks Natural Breaks classification system was used to classify the susceptibility index maps.

- (4) Validation of the constructed models: The ROC curve and the area under the ROC curve were used to test the three models.
- (5) Evaluation procedure of land degradation trends.

Gully erosion inventory

For a better assessment of the relationship among the location of gullies and conditioning factors, it is necessary to create a good inventory in the field and/or by using remote sensing. In this study, a vast field investigation has been conducted to comprehend the spatial pattern and geometrical form of gullies. Five visits were carried out in February 2020, March 2020, April 2020, May 2020, and June 2020. These visits were made in order to be able to detect more easily the zones with large densities of gullies. In these visits, two dual-frequency GNSS receivers, composed of mobile stations, were used to carry out field measurements. GNSS receivers are Topcon GR5 and Topcon HiPer V (Fig. 4). These latter collect data from the satellite as differential GPS, with a horizontal precision of $2.5 \text{ mm} \pm 2 \text{ ppm}$ and a vertical one of $5 \text{ mm} \pm 2 \text{ ppm}$.

A gully can be subdivided into three parts: the head-cut, the main channel, and the downstream end (Fig. 2d).

Table 1 Some morphometric and hydrologic characteristics of the K'sob River watershed

Parameter	Value	Data source
1/ Formal characteristics		
• Basin perimeter (km)	219	DEM
• Basin area (km ²)	1570	DEM
• Basin length (km)	75	DEM
• Mean basin width* (km)	21	Calculated from DEM extracted data
• Length of the main river (km)	88	DEM
• K _G index compacity of Gravelius	1.55	Calculated from DEM extracted data
2/ Topographic characteristics		
• Elevation		
- Min. elevation (m)	478	
- Max. elevation (m)	1865	DEM
- Mean. elevation (m)	1035	
- Std. deviation	239.79	
• Basin Slope (%) average	18.47	DEM
3/ Hydrologic information		
• Number of sub-basins	32	DEM
• Surface runoff**	0.89 m ³ /s	Refer to Benkadja et al. (2013)

* $W = A/L$, where W mean basin width (km), A basin area (km²), L basin length (km)

** Discharges of the K'sob River

Fig. 2 **a** Soil-piping in a dispersive material ($X=4^{\circ}47'33''$, $Y=35^{\circ}59'10''$), **b** gully formation neighboring to a stream, **c** gullies and severe sheet erosion in north-eastern part of the study area, **d** active gully is extended by erosion, and **e** gully erosion through loose soil

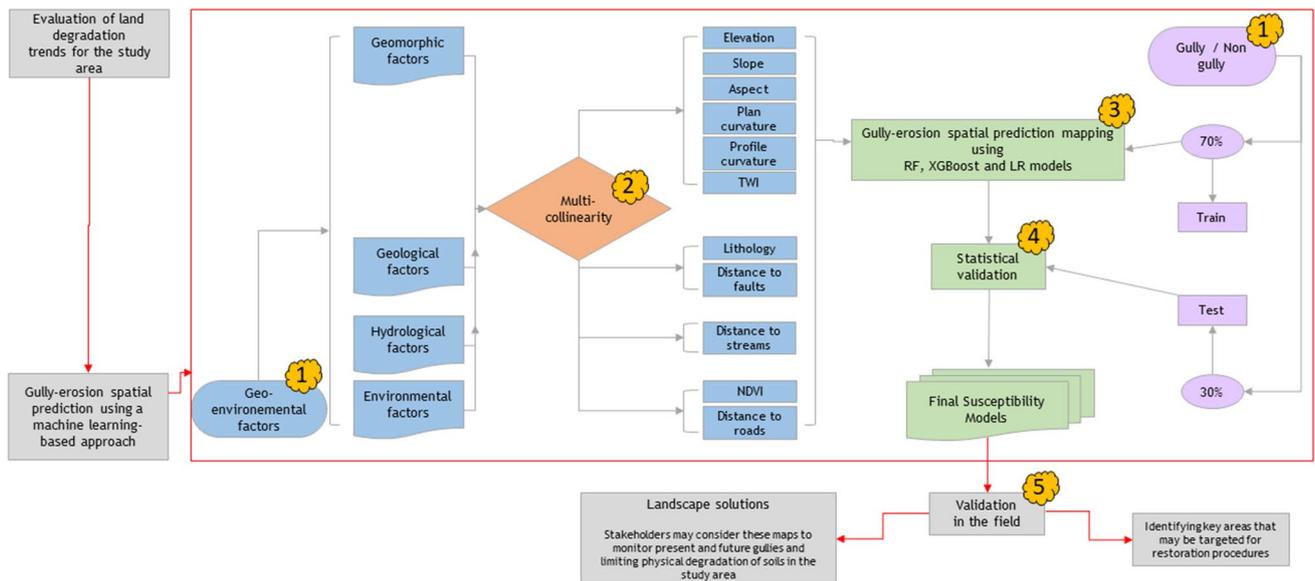
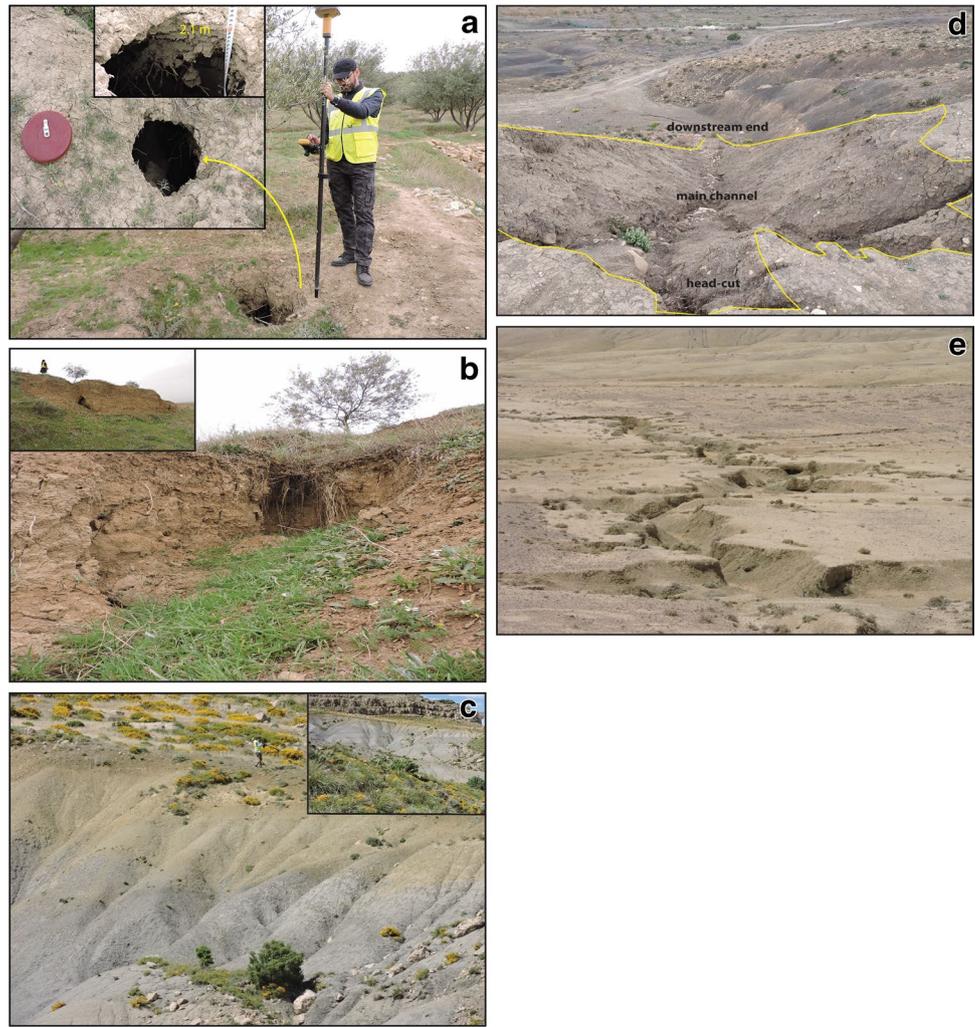


Fig. 3 Study flow diagram

In this inventory, 565 gully erosion locations were registered and verified by Google Earth images. The three parts mentioned above were surveyed for long gullies, whereas for short ones the head-cut location is considered. Gullies were recorded in polygon shape and then converted into gully points (pixel format), using the centroid method in QGIS. However, because model selection corresponds to a presence-absence type, we have chosen an equal number of absence locations, randomly. This creates a balanced data set for further testing. To determine these locations, 565 random locations were selected in a GIS environment. To reduce modeling bias, we generated absence points at a distance of 300 m from the gullies. The main characteristics of gullies (depths, widths, lengths, and shapes) are varied from one gully to another in the study area. The depth varies from 1 to 2 m to 3–4 m with V-shaped cross sections on agricultural land and U-shaped on rangeland. The smallest gully that was identified in the field has an area of 0.000406 km², while the largest one was 1.23 km². Gullies cover about 11 km² of the 1570 km² study area, which is approximately 0.7%. As we can see in Fig. 1, the distribution of gullies is more pronounced in the northern part of the K'sob River watershed. An important process related to gully erosion has appeared in the study area, it is piping (Fig. 2a). Pipes excavate soils and create tunnel-like shapes. The primary cause of the creation of these features is seepage through sensitive and fragile geological formations. In this study, 70% (1032 gridded cells) of gullies be part of the training data. The remaining 30% (443 gridded cells) represents the testing data.

Gully erosion-conditioning factors

To evaluate GESM, the current study used 11 geographic effective factors. Raster layers are generated, in ArcGIS 10.4, for each of the following factors: elevation, slope aspect, slope gradient, plan curvature, profile curvature, distance from roads, distance from faults, distance from streams, topography wetness index (TWI), normalized difference vegetation index (NDVI), and lithology. These factors play a significant role in the occurrence of the phenomenon in the study area. A Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) Digital Elevation Model (DEM) with a grid cell size of 30×30 m was used in the current study. Database with high resolution is not available for this region, as for other regions of developing countries due to the lack of adequate resources for economic and social development.

Figure 5a shows elevation, which is an important predisposing factor. It has a significant role on the occurrence of gully erosion by affecting on vegetation and precipitation patterns (Arabameri et al. 2019b). The elevation in the study area varies from 478 to 1865 m. It is classified into seven classes of less than 500 m, from 500 to 700 m, from 700 to 1000 m, from 1000 to 1300 m, from 1300 to 1600 m, from 1600 to 1800 m, and > 1800 m. The slope aspect is shown in Fig. 5b. It is extracted from the digital elevation model (DEM). The values of this parameter are divided into nine classes: (i) flat (−1°), (ii) north (0–22.5° and 337.5°–360°), (iii) north–east (22.5–67.5°), (iv) east (67.5–112.5°), (v) south–east (112.5–157.5°), (vi)

Fig. 4 The field equipment used: dual-frequency GNSS receivers



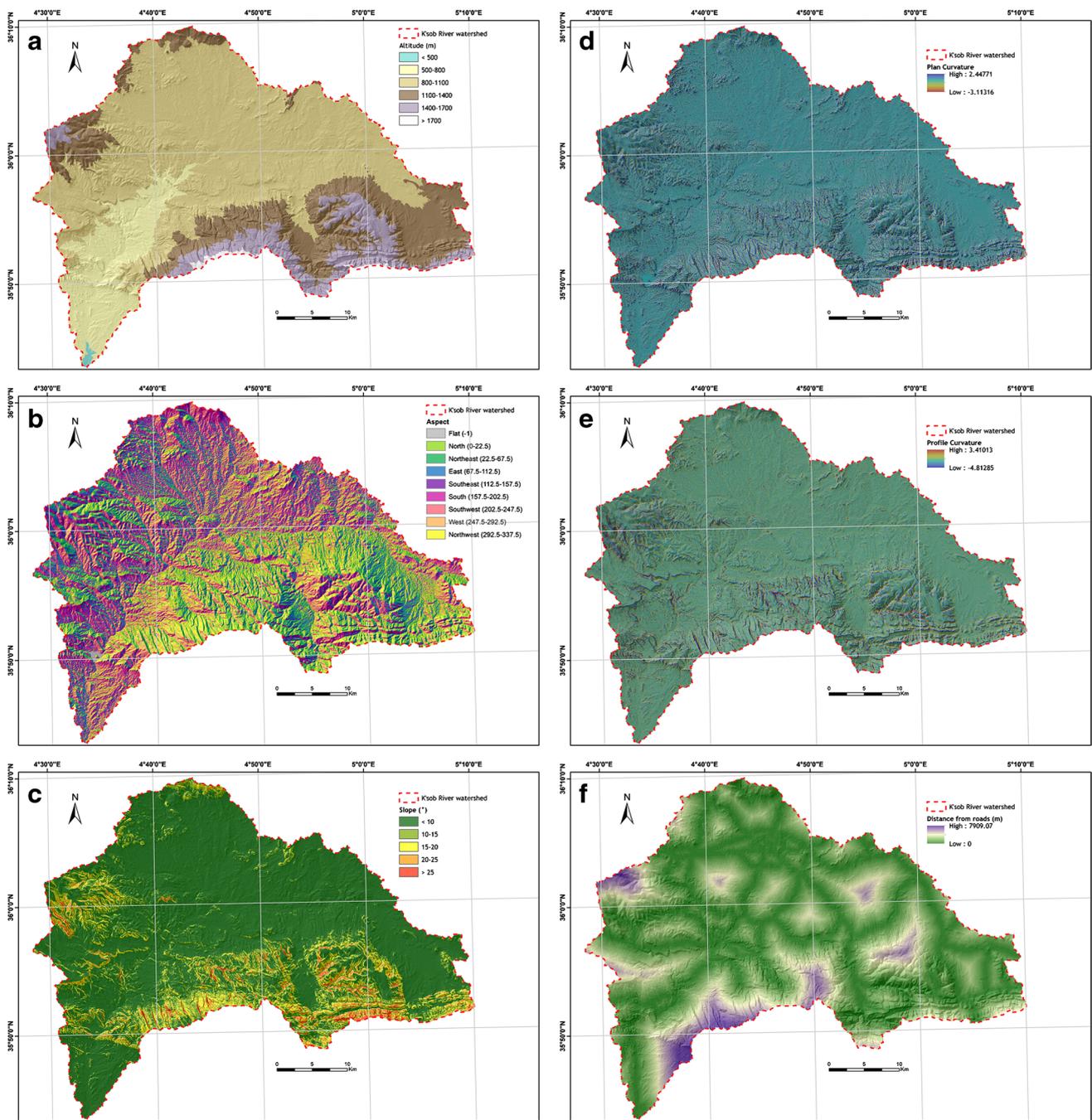


Fig. 5 Gully erosion predictive variables: **a** elevation, **b** slope aspect, **c** slope gradient, **d** plan curvature, **e** profile curvature, **f** distance from roads, **g** distance from faults, **h** distance from streams, **i** TWI, **j** NDVI, and **k** lithology

south (157.5–202.5°), (vii) south–west (202.5–247.5°), (viii) west (247.5–292.5°), and (ix) north–west (292.5–337.5°). According to Fig. 5c, the slope gradient is classified into five classes of less than 10°, from 10 to 15°, from 15 to 20°, from 20 to 25°, and > 25°. Slope affects surface runoff, soil erosion, and drainage density patterns (Arabameri et al. 2019a). Gentle slopes are commonly touched by considerable amounts

of infiltration compared to steeper one, and therefore they can be more susceptible to this phenomenon (Soleimanpour et al. 2021). In this study, plan curvature map was created from the DEM. It showed that the area consists of three parts: flat, convex, and concave (Fig. 5d). Plan curvature affects downslope flow and provokes convergence/divergence of water flows on slopes. Profile curvature map was also extracted from the DEM.

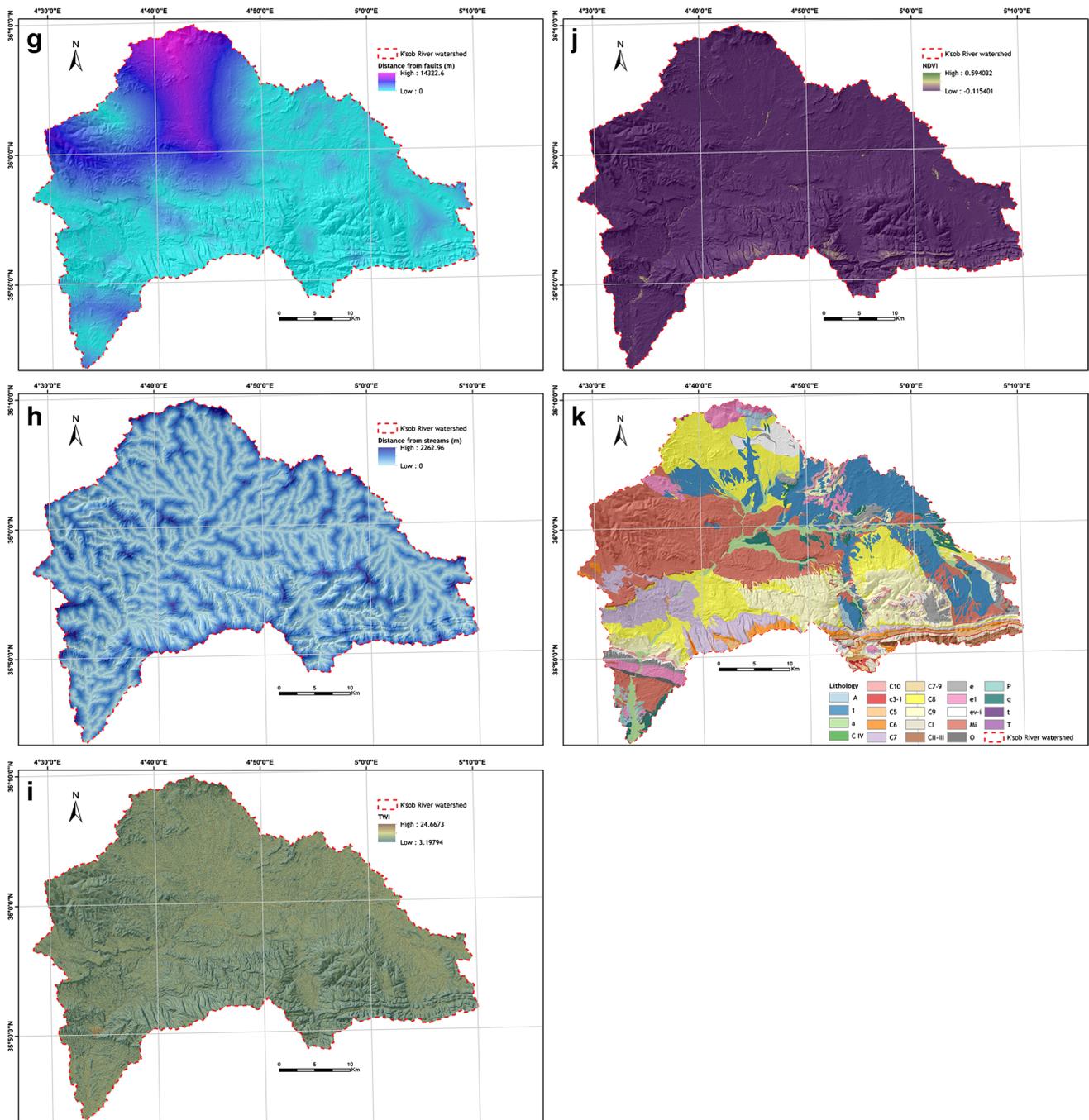


Fig. 5 (continued)

As shown in Fig. 5e, the values of this parameter ranged from -4.81 to 3.41 . Roads represent impervious areas that affect the drainage operation by concentrating surface runoff and altering the hydrological functions of hill slopes. These repercussions considerably increase surface flow and allow faster runoff of rain, which certainly erodes bare areas and causes gullying. The road network layer was extracted from Google Earth images

and appropriate calculations were performed to generate the distance from roads map (Fig. 5f). There is a liaison between gully development and tectonics proved by several researchers. Gully formation was a complicated response to a set of predisposing factors, containing tectonic movements (Knox 1972). In this study, the lineaments network is extracted from the geological maps of the region. The distance from faults map was constructed

by generating buffer zones around lineaments polylines (Fig. 5g). In most cases, gullies are related to the stream network of the studied area (Arabameri et al. 2019c). The distance from streams factor plays an important role in the assessment of gully erosion susceptibility. The eroded material is transported from upland zones through these streams. In the current study, extraction of stream network is done from the DEM. Then a generation of flow direction and flow accumulation maps is realized. After, the Euclidean Distance is used to create the distances from the streams map (Fig. 5h). TWI is essential for recognizing susceptible areas to gully erosion. TWI is usually utilized as an indicator of the potential for surface and subsurface water accumulation due to runoff and lateral transmissivity (Grabs et al. 2009). The topographic wetness index is defined as (Moore et al. 1991):

$$TWI = \ln\left(\frac{As}{\tan\beta}\right) \quad (1)$$

where As is the specific watershed area (m^2/m) and β is the slope gradient in degrees. The values of TWI (Fig. 5i) in the K'sob River watershed have a maximum value of 24.667 and a minimum value of 3.198.

Vegetation can decrease the vulnerability of an area by aiding infiltration and holding soil in places with plants' roots (Arabameri et al. 2019a). The NDVI was computed from Eq. (2):

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (2)$$

where NIR and R are the near-infrared and red bands of the electromagnetic spectrum, respectively. In this study, the NDVI map (Fig. 5j) was generated using the red and near-infrared bands of the LANDSAT-8 OLI Collection 1 images, extracted from the USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov>). Its values were ranged between -0.115401 and 0.594032 , respectively. In this type of study, it would be better to use several images close to the dates when gully erosion was observed to calculate the average NDVI, but unfortunately this was not done due to the unavailability of these images.

The nature of surficial materials plays an important role in the gully process (Arabameri et al. 2019c). The lithology map (Fig. 5k) was prepared by digitizing four geological maps (at 1:50,000 scale). A description of lithologic units is shown in Table 2.

Multicollinearity test

Multicollinearity is a statistical concept for the correlation between two or more independent variables in a dataset. It

is adopted to recognize the susceptibility prediction power of gully erosion predictors. Collinearity between conditioning factors decreases model prediction accuracy. Thus, for models that indicate a sign of collinearity, an exclusion of them is necessary before the beginning of GESM. There are two statistical techniques in multicollinearity: tolerance (TOL) and variance inflations (VIF). Tolerance is the reciprocal of VIF (Arabameri et al. 2019a). The latter has the aptitude to determine further data, decrease the standard errors, and provide a good result compared to traditional methods. The $VIF > 5$ signifies high multicollinearity between conditioning factors, while the $TOL > 0.1$ indicates low multicollinearity.

Gully erosion susceptibility modelling

Random forest

Random forest (RF), proposed by Breiman (2001), is a modern tree-based method that includes several classifications and regression trees. It is a combined classifier in machine learning algorithm or even a tree-based algorithm. RF executing is fast and has a good tolerance for noise and outliers (Liu et al. 2012). RF relies on the process of fitting no decision trees on different subsample and then taking out the average to increase the performance of the model. It is also a non-parametric method for continuous and discrete data modeling of decision tree methods (Yang et al. 2021). The RF is used in the last decade for predicting variable importance in various fields of study, including landslide susceptibility (Achour and Pourghasemi 2020), forest fire susceptibility (Milanović et al. 2020), and groundwater pollution (He et al. 2022). It is known as a very performant algorithm for predicting gully erosion compared to other algorithms (Wang et al. 2021).

In this study, the RF was executed in R® software version 3.6.3 statistical software using the “ranger” package (Wright and Ziegler 2017). The extraction of cells from the gully and non-gully polygons is carried out. This model develops various decorrelated decision trees as a base learner utilizing a part of randomly designated gully training samples and gully conditioning factors, with substitute. Two-thirds of the randomly selected observation were used for the formation of each tree. The lasting 1/3 training data, named out-of-bag (OOB) testers, was employed to test the prediction results. Finally, the plurality vote was applied to assign a pixel to a class. The importance of the assessed gully erosion variables was evaluated using the mean decrease accuracy and the mean decrease in Gini. The latter represents the mean of the total decrease in node impurity of the conditioning factor, rated by the fraction

Table 2 Lithology of the study area

Code	Lithology*	Geological age
Q.a.A.q	Q. Ancient alluvium from the valleys a. Recent alluvium A. Old and recent alluvium and scree q. Ancient alluvium from the plateau	Quaternary
T	Sedimentary limestone rock	Travertin
P	Gravel and conglomerate terraces	Pliocene
Mi	Sandy clays, coarse sandstone, conglomerates, yellow loaf marl, sandstone marl, fossiliferous sandstone, conglomerates, and continental red clays	Miocene
O	Continental red sandstones and clays and white marls, and red sandstone banks	Oligocene
e ₁	Oyster lumachelle clays, gypsum and white clays, marly limestones with thersites	Upper Lutetian
e	Light gray limestones and marls, blackish limestones with black flint	Lower Lutetian
e _{v-1}	Flint limestones and phosphate limestones	Ypresian—Thanetian
C ₁₀	Clayey marls with calcareous intercalations in <i>Cardita beaumonti</i>	Danomontian
C ₉	<i>Orbitoides media</i> limestones, microbrechoid limestones, marly limestones, and gray marls	Maastrichtian
C ₈	Gray marl, limestone marl, and lumachelles from <i>Ostraceae</i>	Campanian
C ₇₋₉	Marls, limestones, lumachelles, and limestone areas in <i>Inocerames</i>	Senonian
C ₆	Limestone and bedded dolomite	Turonian
C ₅	Marls in <i>Mantelliceras</i> sea urchins and oysters	Cenomanian
C ₇	Zoogenic limestones, marly limestones, dolomites; lumachelles of <i>Ostraceae</i>	Emscherien
C ₃₋₁	Glauconous limestones, nodular marnocalcaires, zoogenic limestones and dark gray marls	Albian
C ₁	Oolitic limestones, limestones with <i>Orbitolines</i> and <i>Rudists</i> , sandstones, dolomites and marls	Upper Aptian
C _{II-III}	Dolomites, limestones, marls, sandstones, and clays	Lower Aptian- Barremian
C _{IV}	Gray limestones, limestone and marl, sandstone, and sandstone marl	Hauterivien
t	Oophito-gypsum, vein gypsum, ophite	Trias

Data source: Geological maps of (i) Bordj Bou Arreridj, (ii) Aine Taghrouit, (iii) Tocqueville (iv) Maadid, and (v) M’sila

of samples joining that node in every specific decision tree in random forest.

Extreme Gradient Boosting

Based on the theory of gradient boosting machine (GBM) (Friedman 2002), this method is commonly known as a powerful decision tree. It uses the concept of boosting presented by Chen and Guestrin (2016). It contributes in the construction of a prediction model in the form of a boosting ensemble of weak classification trees by a gradient descent that optimizes the loss function (Yang et al. 2021). It is more effective and can be employed for both classification and regression. It adds numerous decision tree models to produce a classification, with higher accuracy, based on the iteration process.

The formula of the Extreme Gradient Boosting (XGBoost) model is given in Eq. (3) (Pham et al. 2021):

$$J(ft) = \sum_{i=1}^n L\left(y_i, \hat{y}_i^{(t-1)} + ft(x_i)\right) + \Omega(ft) + C \tag{3}$$

where *i* signifies the *i*th sample, $\hat{y}_i^{(t-1)}$ serves as the expected value of the (*t*-1)th model for the sample *i*, *ft*(*x_i*) means the newly added *t*th model, $\Omega(ft)$ refers to the regular term, *C* represents some constant terms, and the outermost *L*() is the error.

In this study, The R® software version 3.6.3 was used to perform XGBoost. The following XGBoost parameters were tested and upgraded: number of iterations (*m*), learning rate (η), maximum tree depth (*h*), minimum loss reduction (γ), minimum sum of instance weight (ζ), subsample percentage (μ), and subsample ratio of columns (ϵ) (Table 3).

Logistic regression

In more recent years, use is often made of logistic regression (LR) technique for gully erosion susceptibility in several

Table 3 Optimal XGBoost’s parameters values

Parameter	<i>m</i>	<i>h</i>	η	γ	ϵ	ζ	μ	RMSE
XGBoost	180	6	0.3	0.1	0.75	3	1	1.475

studies. It is based on the principle of mapping the results of a linear regression between 0 and 1. For gully erosion evaluation, the independent variable is gullies distribution, where 0 signifies the absence of the phenomenon and 1 signifies that gullying hazard occurs. The optimal fitting function is well established to expose the relationship among independent and dependent variables. The likelihood of gully erosion occurrence can be expressed as follows (Pham et al. 2021):

$$P = \frac{1}{(1 + e^{-z})} \tag{4}$$

where P is the likelihood of gully erosion occurrence, and Z is the sum of linear weight values after variable superposition.

The relationship between the probability of gully erosion occurrence and conditioning factors can be obtained by Eq. (5).

$$Z = \text{Logit}(P) = \ln \frac{P}{1 - P} = c_0 + c_1x_1 + \dots + c_nx_n \tag{5}$$

where c_0 is the constant coefficient; x_1, x_2, \dots, x_n are the evaluation factors of each gully; c_1, c_2, \dots, c_n are LR model coefficients.

Validation

The ROC curve is used to measure the prediction accuracy of the three models. In this study, 30% of the gullies were employed to validate the models based on the computation of the area under the curve (AUC). The AUC value is from 0 to 1. The closer it is to 1, the better the accuracy of the model. The ROC-AUC can be calculated by Eqs. (6) to (8).

$$\text{Sensitivity} = \frac{TP}{TP + FN} \tag{6}$$

$$\text{Specificity} = \frac{TN}{FP + TN} \tag{7}$$

$$\text{AUC} = \int_0^1 \text{ROC}(t) \tag{8}$$

where TP and TN are the true positive and true negative, respectively, which represent a number of gully erosion pixels rightly classified. FN and FP are the false negative and false positive, respectively, representing a number of gully erosion pixels wrongly classified. t is the threshold value. The performance of the applied models was also assessed with the std. error and the confidence interval at 95%.

Results

Determination of factor multicollinearity

Before selecting the factors and constructing GESM, it is necessary to check the multicollinearity of the employed factors and evaluate the relationship between them to confirm the absence of multicollinearity. An analysis of multicollinearity among the eleven gully erosion-conditioning factors have been completed using the tolerance and variance inflation indices. The obtained values are shown in Table 4. The results indicate that the maximum and minimum of VIF and TOL were (3.211–1.054) and (0.947–0.354), respectively. Finally, all factors can be incorporated in GESM because there is no collinearity within them.

The most important factors for GESM using the RF model

RF model was applied to obtain the Mean Decrease in Accuracy (MDA) and the Mean Decrease in Gini (MDG) scores. As shown in Fig. 6, five factors can be considered important for the occurrence and development of gullies in the study area. Distance from streams, TWI, lithology, slope gradient, and elevation are the most effective factors for gully erosion susceptibility mapping. Based on MDG, the distance from roads, plan curvature, distance from faults, slope aspect, profile curvature, and NDVI were classified from 6 to 11th respectively.

Gully erosion susceptibility models

The gully erosion susceptibility maps produced via the three algorithms (RF, XGBoost, and LR) were classified into five classes based on the Jenks Natural Breaks classification

Table 4 Multicollinearity test among conditioning factors

Factor	Collinearity	
	Tolerance	VIF
Slope	0.587	1.732
Aspect	0.879	1.054
Elevation	0.947	1.097
TWI	0.802	1.198
Profile curvature	0.812	1.234
Plan curvature	0.798	1.967
NDVI	0.354	2.498
Lithology	0.642	1.563
Distance from streams	0.502	3.014
Distance from roads	0.462	3.211
Distance from faults	0.899	1.189

Fig. 6 The most important factors for GESM using the RF model

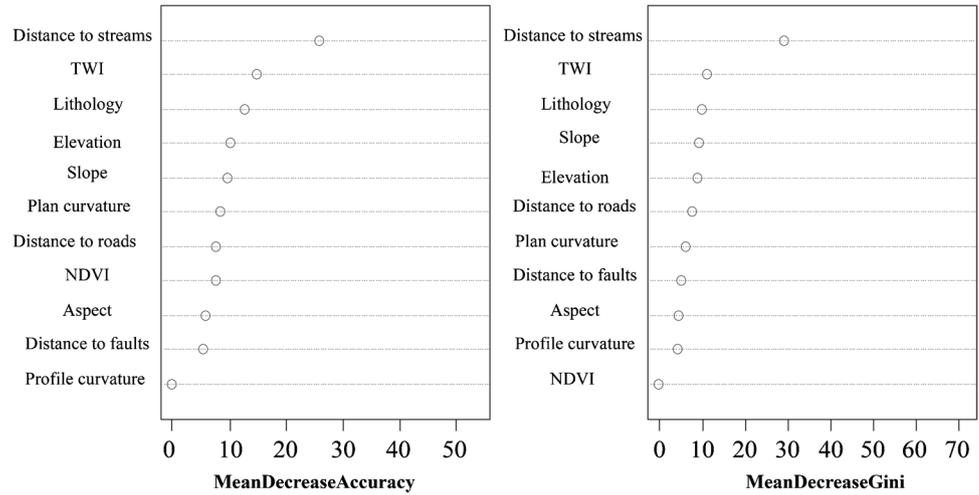


Table 5 Gully erosion susceptibility classes for the three models

Map	Susceptibility class	Number of pixels in class	% of pixels in class
XGBoost	Very low	2930	7.23
	Low	13,788	34.00
	Medium	17,431	42.98
	High	4983	12.29
	Very high	1420	3.50
RF	Very low	6248	15.41
	Low	9972	24.59
	Medium	8110	20.00
	High	8112	20.00
	Very high	8110	20.00
LR	Very low	6754	16.66
	Low	16,993	41.90
	Medium	11,711	28.88
	High	4084	10.07
	Very high	1010	2.49

system (Achour and Pourghasemi 2020), characterizing five different zones in gully erosion maps: very low, low, moderate, high, and very high (Table 5).

For the XGBoost method, the 1032 gully pixels were employed to create the model. The following default parameters were used to generate the first model: $m = 200$, $h = 6$, $\eta = 0.3$, $\gamma = 0$, $\epsilon = 1$, $\zeta = 1$, and $\mu = 1$ (Chen et al. 2020). Therefore, we try to increase the accuracy of this model, which is equal to 0.821, by executing XGBoost’s hyper-parameters optimization. To recognize the optimal parameters, a grid search method was tested in this study as follows: (m) was set from 160 to 200, (h) set to 6, 12, 18, and 24, (η) set to 0.05, 0.5, and 1.0, (γ) set to 0, 0.05, and 0.1, (ϵ) set from 0.5 to 2.0 (the step is 0.5),

(ζ) set to 0, 1, and 3.0, and (μ) set from 0.5 to 2.0 (the step is 0.5). Based on this process, the optimal XGBoost’s parameters and the resulting RSME are found (Table 4). In addition, Fig. 7 illustrates the efficiency of this model with diverse hyper-parameters. Furthermore, the results of the XGBoost GESM classification (Fig. 9a) show that the moderate-prone area covers the plurality of the watershed (43%). The very low, low, high, and very high likelihood gully erosion susceptibility levels occupy 7.23%, 34%, 12.29%, and 3.5% of the watershed, respectively.

The random forest model was prepared employing the training data (1032 gully pixels), where 500 trees and 3 factors tested at each split were considered after hyper-parameters tuning. The aggregate OOB errors, shown in Fig. 8, were utilized to define the number of trees. The OOB in the study area was 24.28%. It is revealed that the model accuracy is more than 75%, which is a good value. The GESM produced via RF model (Fig. 9b) shows that 40% of the total watershed had very low and low gully erosion susceptibility. Highly and very highly susceptible zones constitute 40% of the study area. The moderately susceptible zone value was 20%.

For LR model, the coefficients of each conditioning factor were used for computing the index of GESM. The formula can be rewritten in Eq. 9:

$$\begin{aligned}
 LR = & (0.656 \times \text{slope}) + (0.034 \times \text{aspect}) \\
 & + (0.021 \times \text{elevation}) + (-0.321 \times \text{TWI}) \\
 & + (-0.022 \times \text{profile curvature}) \\
 & + (-0.037 \times \text{plan curvature}) + (0.016 \times \text{NDVI}) \\
 & + \text{lithology} + (1.039 \times \text{distance from streams}) \\
 & + (0.052 \times \text{distance from roads}) \\
 & + (-0.158 \times \text{distance from faults}) - 87.2
 \end{aligned} \tag{9}$$

The above-mentioned coefficients were multiplied by the respective conditioning factors to get the final GESM

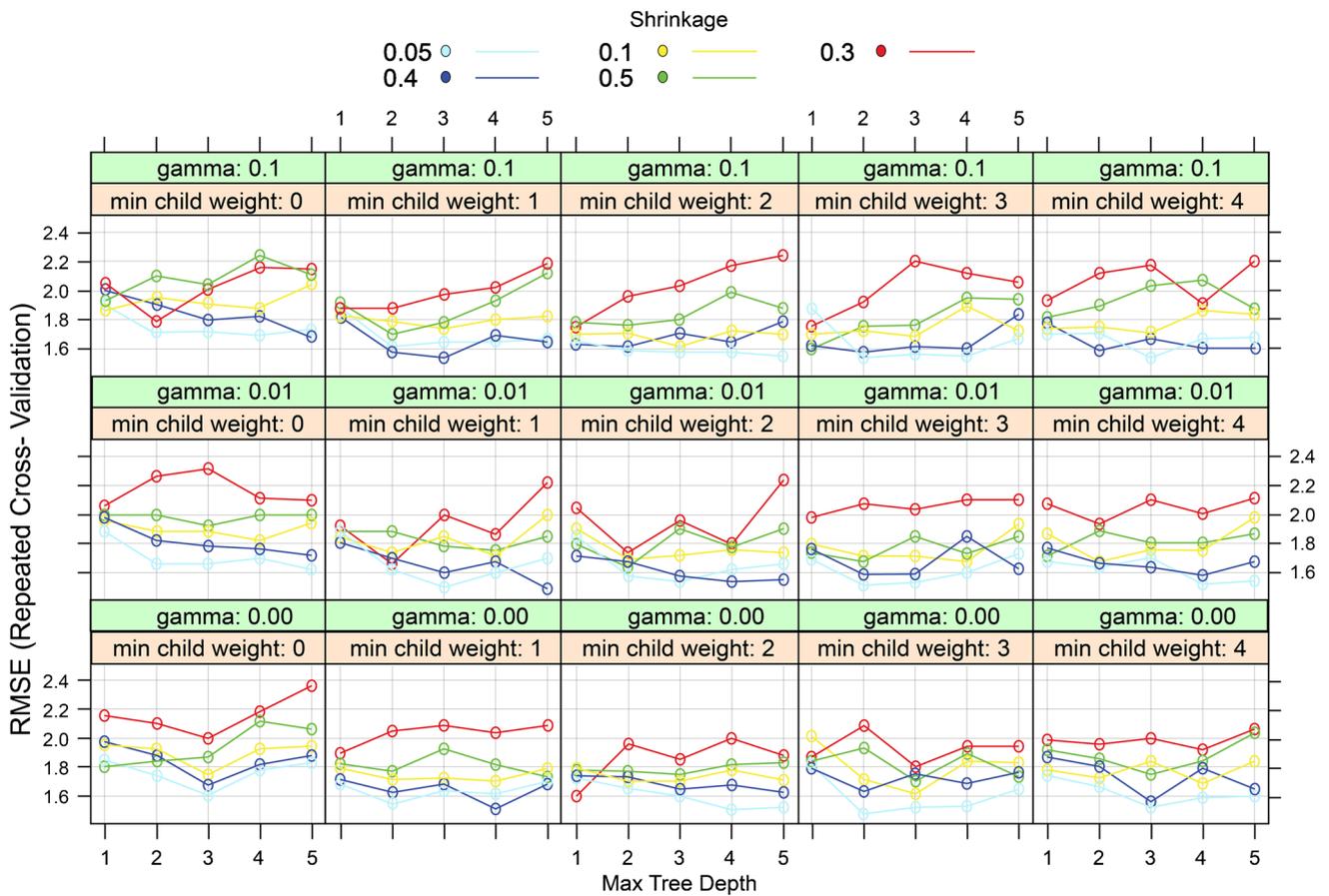


Fig. 7 Efficiency of the XGBoost model with the different hyper-parameters

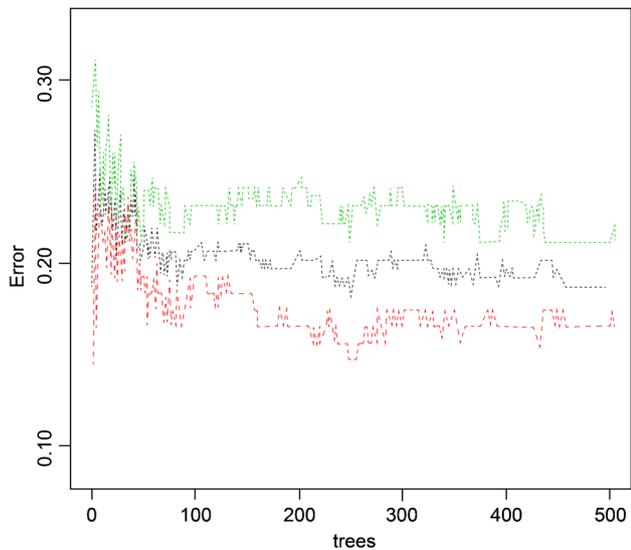


Fig. 8 OOB error plot (0, non-landslide (red line); and 1, landslide (green line))

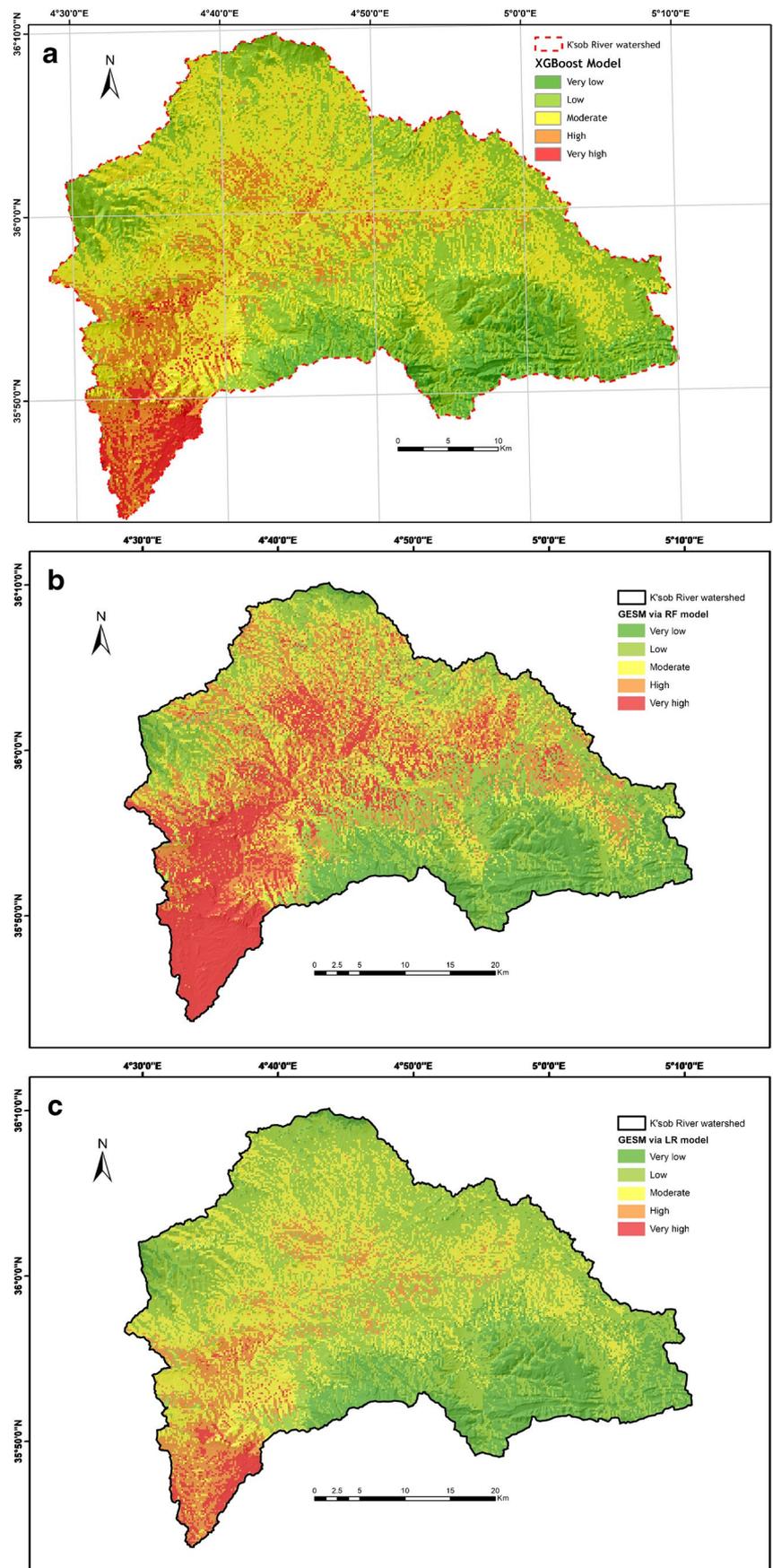
(Fig. 9c). The analysis of these coefficients allows us to state that slope gradient, slope aspect, elevation, NDVI, distance

from streams, and distance from roads had positive values signifying the important role of these factors in gully erosion assessment for the K’sob River watershed. The other factors had negative coefficients, making them ineffective for the modelling process. The classified results of the index map constructed via LR revealed that out of the total area of the K’sob River watershed, 2.49% and 10.07% belong to very high and high susceptible classes, respectively, while 28.88%, 41.90%, and 16.66% correspond to moderate, low, and very low susceptible classes, respectively.

GESM accuracy

The accuracy of the constructed models was evaluated using the AUC, the std. error, and the Confidence interval at 95%. Based on AUC values, the accuracy can be classified into five classes, namely: poor (50–60%), average (60–70%), good (70–80%), very good (80–90%), and excellent (90–100%) (Yesilnacar and Topal 2005). The results presented in Fig. 10 clearly show that the three models have an excellent accuracy based on the AUC value. With an AUC value of 0.942, the XGBoost model is the best model

Fig. 9 Gully erosion susceptibility map produced using: **a** XGBoost, **b** RF, and **c** LR models



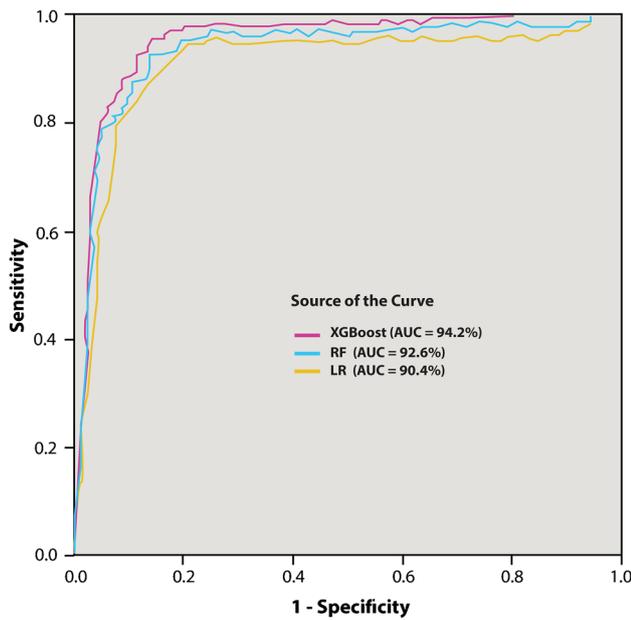


Fig. 10 The receiver operating characteristic (ROC) curve generated using testing data (30%)

Table 6 Validation values

Models	AUC	Std. error	CI (95%)	
			Lower bound	Upper bound
XGBoost	0.942	0.009	0.893	0.971
RF	0.926	0.014	0.873	0.953

compared to the other models. The results of the std. error and the confidence interval at 95% (Table 6) are in good agreement with the results of AUC. The XGBoost model had the smallest std. error (0.009), and the narrowest CI (0.893–0.971) compared to the RF and LR models. The AUC, std. error, and CI of the RF model were 0.926, 0.014, and 0.873–0.953, respectively. The LR model has the poorest accuracy compared to the other models, with an AUC value of 0.904. In this study, all the gully erosion spatial prediction models show a reasonable goodness-of-fit with validation data.

Discussion

Here, the obtained results are analyzed according to the following three parts: (1) comparison among the three models based on their performances, (2) relationship between effective conditioning factors and their impact on gully erosion in the study area, and (3) explore the utility of the final models in the evaluation of land degradation in the study area.

- (1) The methods used in this study have several advantages in modeling. Their performance depends on the quality of data and the study area features (Achour et al. 2021). In the current research, the result of model validation shows that the XGBoost model was the most accurate method. The better performance of this model may be due to its high precision and effectiveness (Amiri et al. 2019). XGBoost can fit absent functions with an in-built process (Chen et al. 2021). It can connect a lost value on a node and break both the left and right side and discover how an individual node loses more (Arabameri et al. 2019b). The RF model had ordered second in gully erosion susceptibility mapping among the models tested. One of its great advantages is the capability to conduct several input factors without variable deletion. It is capable to manage with adjustment and nonlinearities between principal factors (Rodriguez-Galiano et al. 2014). The LR model is included in this research because of its facility, high effectiveness, especially in the interpretation phase of the results (Conoscenti et al. 2014). The three models have verified, by several investigators, in diverse fields of research, as landslide susceptibility mapping (LSM), fire prediction, flood susceptibility evaluation, and groundwater potential mapping.
- (2) The three models generated in this study show clearly that the high and very high gully susceptibility areas were found, essentially, in the middle part of the K’sob River watershed and extending to its outlet. Medium susceptibility classes are taking almost the same distribution of the high and very high susceptibility areas with slight extension in the four directions. Low and very low susceptibility zones are mainly located in high-altitude regions.

Several researchers have used different factors in the assessment of gully erosion susceptibility. The majority of them used almost the same factors in their analysis, namely elevation, precipitation, slope angle, curvature, lithology, drainage density, topographic wetness index, NDVI, slope aspect, and distance from streams. Additional factors have been considered by other investigators like overgrazing, which was added as a conditioning factor by Nicu (2018). In addition, the distance from roads has been used in gully erosion susceptibility by Pourghasemi et al. (2017). In this section, we examine the impact of conditioning factors in the occurrence of gullies in the K’sob River watershed. The most important factors affecting gully formation may be different from one study area to another. In this study, the critical factors for GESM were obtained from the RF model using the MDA and the MDG scores. The results of this analysis show that distance from streams, TWI, lithology, slope gradient, and elevation are the most effective factor

for GESM. Connectivity of gullies with stream networks can simplify the transport of eroded sediment come from upland zones in the watershed and increase gully erosion formation (Conoscenti et al. 2014). Flatlands are greatly susceptible to gully erosion (Arabameri et al. 2019c). In this research, we have found that high TWI is strongly related to gully development. The location of the high and very high susceptibility zones is considerably related to the lithology of these zones. These areas are mainly formed by terrains consisting of alluvial terraces, clays, and marls. Zones with gentle slopes have been likely for accumulation of overland flows that can initiate gully formation (Arabameri et al. 2019b). In the study area, gullies developed mainly in areas below 800 m of altitude and on slopes less than 10° .

The effect of climate is notable and can be considered as an important factor in the occurrence of gullies. The study area belongs to a region characterized by a semi-arid climate, where the average precipitation per year is comprised between 340 and 400 mm. In the last decade, there is a remarkable climatic change in this area. The rains fall only in the first two months of autumn, whereas in the other

months, there is no or very few rainfalls. The main cause of this change is the appearance of an intermittent flow of water. The latter is one of the key factors associated with climate changes in semi-arid regions that are affecting the gully erosion process.

- (3) The only order of magnitude available concerning the importance of erosion in the K'sob River watershed comes from a study performed by Benkadja et al. (2013). They assessed soil loss and siltation of the hydrological system of this watershed using four direct and indirect methods. In this work, the PISA (in Italian: Previsioni dell'Interimento nei Serbatoi Artificiali) model is considered as the most robust one to complete the assessment of soil loss, by calculating the index of siltation defined by the annual volume of wet sediment versed in the dam per unit area of the watershed "Y." The results show that the latter had a value of $1822 \text{ m}^3 \text{ km}^{-2} \text{ year}^{-1}$. In addition, siltation is approximately $2915 \text{ t km}^{-2} \text{ year}^{-1}$, with a wet sediment density of 1.6. The K'sob River watershed is seriously influenced by

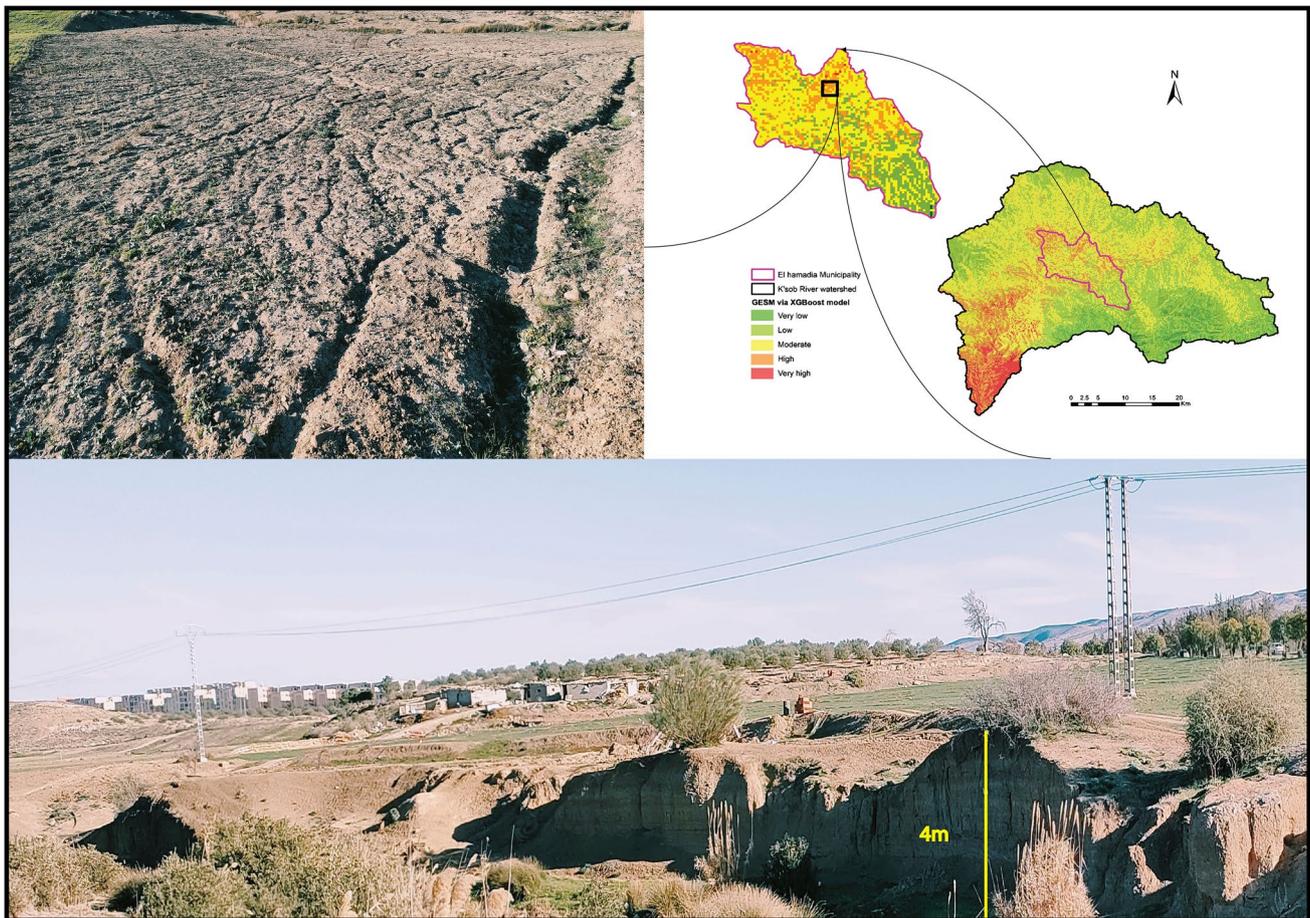


Fig. 11 Farming practices had a serious influence on the reshaped of this active gully area

soil erosion as it is mentioned by Benkadja et al. (2013) and attended by the occurring deep and wide gullies in this study, which have an important role in the soil loss process.

For the best monitoring of the development of these gullies, we have generated the three models (XGBoost, RF, and LR). These maps can help in the identification of high-priority land degradation areas that can be selected for further restoration procedures in the study area. As mentioned in part 1 of this section, the XGBoost model was the most accurate compared to the other models. Several field works were carried out, where we have found a high similarity among the location of high and very high susceptible areas of this model and the location of gullies in several test zones. Then, an assessment of the role of the XGBoost map for detecting key zones or “hot spots” is completed. This model proves its capability of detecting these hot spots in the study area. To protect the fertility and agronomic value of agricultural lands, a sampling point was identified in the high susceptibility area. This point is a damaged agricultural land located in El Hamadia Municipality, which is subject to tillage practices that dislocate soil and concentrate surface runoff (Fig. 11).

Conclusion

Gully erosion constitutes a huge hazard for agricultural land fertility as well as for a wide range of environmental problems in the K'sob River watershed. Information about the importance, identification and prevention of gullies are lacking for this region. To comprehend the spatial distribution of gullies and identify high-risk zones for gully development, diverse approaches to assess gully erosion susceptibility at the basin level are required for regional development. In his context, advanced GESMs of this region are generated using machine learning-based approaches. In this study, three machine learning models, RF, XGBoost, and LR, were tested. The relationships between the eleven conditioning factors and gullies were evaluated using these three learning models to find the most susceptible areas to this hazard.

To assess the accuracy and predictive capability of gully erosion susceptibility maps, the ROC curve shapes were tested. The obtained results indicated that the three machine learning techniques (XGBoost RF and LR) provided good accuracy in predicting gully erosion in the study area. Another validation, in the field, has been performed to determine the relationship between the location of high and very high susceptible areas of the XGBoost model (due to its high performance) and the location of gullies in several test zones. We have found a

high similarity among them, which proves the capability of this model in detecting hot spots in the study area.

The results of this work can be suitable to monitoring diverse features of gully development such as: their degree of susceptibility, its likely location and soil types that are disturbed. It has been shown in the literature that susceptibility maps can effectively help in selecting various mitigation options (Bathrellos et al. 2017). The efficient utilization of these maps at the planning stage can bring significant benefits in land use planning or urban construction. The latter, could be conducted in low susceptible areas, which could effectively reduce environmental hazard losses. In addition, the results of this work can help in the identification of high-priority land degradation areas that can be selected for further restoration procedures in the study area. It constitutes a possible support for the estimation of injuries that this hazard makes to the farmers. A cooperation with the competent authorities is necessary in order to give them these maps to carry out their evaluation concerning this phenomenon.

Acknowledgements The authors gratefully acknowledge the editors of this journal and reviewers. They are also grateful to EURL Best Engineering Khababa (Bordj Bou Arreridj), which is a technical consulting, construction supervision, and multi-disciplinary engineering firm. We thank its manager for having equipped us with GNSS receivers to achieve the fieldwork.

Author contribution Ilhem Drid: data curation, software, writing original draft. Yacine Achour: project administration, conceptualization, review and editing, formal analysis, software, visualization. Karim Zighmi: review. Oussama Khababa, Thamer Nouioua, Samra Rahmani, Oumelkheir Ouadfel, and Bachir Atoui: data curation, software.

Code availability The independent variables are prepared using ArcGIS 10.4 Then the susceptibility maps are generated using R 3.6.3 statistical packages. In addition, no code or software has been developed for this research.

Declarations

Conflict of interest The authors declare no competing interests.

References

- Abdellah M, Mohamed H, Farouk D (2018) The implication of climate change and precipitation variability on sedimentation deposits in Algerian dams. *Arab J Geosci* 11:733–733. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-4100-7>
- Achour Y, Pourghasemi HR (2020) How do machine learning techniques help in increasing accuracy of landslide susceptibility maps? *Geosci Front* 11:871–883. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2019.10.001>
- Achour Y, Boumezeur A, Hadji R, Chouabbi A, Cavaleiro V, Bendaoud EA (2017) Landslide susceptibility mapping using analytic hierarchy process and information value methods along a highway road section in Constantine, Algeria. *Arab J Geosci* 10:194–194. <https://doi.org/10.1007/s12517-017-2980-6>

- Achour Y, Garçia S, Cavaleiro V (2018) GIS-based spatial prediction of debris flows using logistic regression and frequency ratio models for Zêzere River basin and its surrounding area, Northwest Covilhã, Portugal. *Arab J Geosci* 11:550–550. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3920-9>
- Achour Y, Saidani Z, Touati R, Pham QB, Pal SC, Mustafa F, Balik Sanli F (2021) Assessing landslide susceptibility using a machine learning-based approach to achieving land degradation neutrality. *Environ Earth Sci* 80:575–575. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09889-9>
- Ahmad NSBN, Mustafa, Didams GJIS (2020) A systematic review of soil erosion control practices on the agricultural land in Asia. *Int Soil Water Conserv Res* 8(2):103–115. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2020.04.001>
- Al-Bawi AJ, Al-Abadi AM, Pradhan B, Alamri AM (2021) Assessing gully erosion susceptibility using topographic derived attributes, multi-criteria decision-making, and machine learning classifiers. *Geomat Nat Haz Risk* 12:3035–3062. <https://doi.org/10.1080/19475705.2021.1994024>
- Amiri M, Pourghasemi HR, Ghanbarian GA, Afzali SF (2019) Assessment of the importance of gully erosion effective factors using Boruta algorithm and its spatial modeling and mapping using three machine learning algorithms. *Geoderma* 340:55–69. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.12.042>
- Angileri SE, Conoscenti C, Hochschild V, Märker M, Rotigliano E, Agnesi V (2016) Water erosion susceptibility mapping by applying Stochastic Gradient Treeboost to the Imera Meridionale River Basin (Sicily, Italy). *Geomorphology* 262:61–76. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.03.018>
- Arabameri C, Rodrigo C, Pradhan S, Blaschke BT (2019a) Proposing a novel predictive technique for gully erosion susceptibility mapping in arid and semi-arid regions (Iran). *Remote Sensing* 11:2577–2577. <https://doi.org/10.3390/rs11212577>
- Arabameri A, Pradhan B, Rezaei K (2019b) Spatial prediction of gully erosion using ALOS PALSAR data and ensemble bivariate and data mining models. *Geosci J* 23:669–686. <https://doi.org/10.1007/s12303-018-0067-3>
- Arabameri A, Pradhan B, Lombardo L (2019c) Comparative assessment using boosted regression trees, binary logistic regression, frequency ratio and numerical risk factor for gully erosion susceptibility modelling. *CATENA* 183:104223–104223. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104223>
- Balla F, Kabouche N, Khanchoul K, Bouguerra H (2017) Hydro-sedimentary flow modelling in some catchments Constantine highlands, case of Wadis Soultz and Reboa (Algeria). *J Water Land Dev* 34:21–32. <https://doi.org/10.1515/jwld-2017-0035>
- Bathrellos GD, Skilodimou HD, Chousianitis K, Youssef AM, Pradhan B (2017) Suitability estimation for urban development using multi-hazard assessment map. *Sci Total Environ* 575:119–134. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.025>
- Belarbi F, Bouchelkia H, Remini B, Benmansour A (2018) Quantification and study of monthly variation of suspended sediment loads in Tafna basin – Algeria. *J Water Land Dev* 37:29–38. <https://doi.org/10.2478/jwld-2018-0022>
- Benkadjia R, Hattab A, Mahdaoui N, Zehar C (2013) Assessment of soil losses and siltation of the K'sob hydrological system (semiarid area—East Algeria). *Arab J Geosci* 6:3959–3968. <https://doi.org/10.1007/s12517-012-0653-z>
- Benselama O, Hasbaia M, Djoukbal O, Mazour M, Mokhtari S (2019) Analysis of the suspended sediment yield at different time scales in mediterranean watershed, case of Wadi El Maleh (North-West of Algeria). *researchgatenet* 11. <https://doi.org/10.3304/JMES.2019.001>
- Bouchelkia H, Belarbi F, Remini B (2014) Quantification of suspended sediment load by double correlation in the watershed of Chellif (Algeria). *J Water Land Dev* 21:39–46. <https://doi.org/10.2478/jwld-2014-0012>
- Boudani MR, Mazour M, Mazighi H, Djoukbal O (2020) Development of a minimalist conceptual numerical model for flood forecasting and management under GIS environment. *J Water Clim Chang* 11:359–386. <https://doi.org/10.2166/wcc.2020.265>
- Bouguerra SA, Bouanani A, Baba-Hamed K (2017b) Transport solide dans un cours d'eau en climat semi-aride : cas du bassin versant de l'Oued Boumessaoud (nord-ouest de l'Algérie). *Rev Sci Eau* 29:179–195. <https://doi.org/10.7202/1038923ar>
- Bouguerra H, Bouanani A, Khanchoul K, Derdous O, Tachi S E J J O W, L Development (2017a) Mapping erosion prone areas in the Bouhamdane watershed (Algeria) using the Revised Universal Soil Loss Equation through GIS. 13--23
- Breiman L (2001) Random forests. *Mach Learn* 45:5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Carabassa V, Montero P, Alcañiz JM, Padró J-C (2021) Soil erosion monitoring in quarry restoration using drones. *Minerals* 11:949–949. <https://doi.org/10.3390/min11090949>
- Castillo C, Gómez JA (2016) A century of gully erosion research: urgency, complexity and study approaches. *Earth Sci Rev* 160:300–319. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.07.009>
- Chen J, Zhao F, Sun Y, Yin Y (2020) Improved XGBoost model based on genetic algorithm. *Int J Comput Appl Technol* 62:240–240. <https://doi.org/10.1504/IJCAT.2020.106571>
- Chen W, Lei X, Chakraborty R, Chandra Pal S, Sahana M, Janizadeh S (2021) Evaluation of different boosting ensemble machine learning models and novel deep learning and boosting framework for head-cut gully erosion susceptibility. *J Environ Manage* 284:112015–112015. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112015>
- Chen T, C Guestrin (2016) XGBoost. *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, New York, NY, USA, ACM
- Chowdhuri I, Pal SC, Arabameri A, Saha A, Chakraborty R, Blaschke T, Pradhan B, Band SS (2020) Implementation of artificial intelligence based ensemble models for gully erosion susceptibility assessment. *Remote Sensing* 12:3620–3620. <https://doi.org/10.3390/rs12213620>
- Conoscenti C, Angileri S, Cappadonia C, Rotigliano E, Agnesi V, Märker M (2014) Gully erosion susceptibility assessment by means of GIS-based logistic regression: a case of Sicily (Italy). *Geomorphology* 204:399–411. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.08.021>
- Djoukbal O, Hasbaia M, O B W F . . . , undefined (2022) Water erosion and sediment transport in an ungauged semiarid area: the case of Hodna Basin in Algeria. *libraryopenorg*
- Escobedo FJ, Giannico V, Jim CY, Sanesi G, Laforteza R (2019) Urban forests, ecosystem services, green infrastructure and nature-based solutions: nexus or evolving metaphors? *Urban For Urban Green* 37:3–12. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.02.011>
- Eugenia M, González P, García Rodríguez P, Pérez E, García P (2017) Monitoring soil erosion by raster images: from aerial photographs to drone taken pictures. *researchgatenet* 7:117–129
- Friedman JH (2002) Stochastic gradient boosting. *Comput Stat Data Anal* 38:367–378. [https://doi.org/10.1016/S0167-9473\(01\)00065-2](https://doi.org/10.1016/S0167-9473(01)00065-2)
- Gameiro S, Riffel ES, de Oliveira GG, Guasselli LA (2021) Artificial neural networks applied to landslide susceptibility: the effect of sampling areas on model capacity for generalization and extrapolation. *Appl Geogr* 137:102598–102598. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2021.102598>
- Gayen A, Pourghasemi HR, Saha S, Keesstra S, Bai S (2019) Gully erosion susceptibility assessment and management of hazard-prone areas in India using different machine learning algorithms. *Sci*

- Total Environ 668:124–138. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.436>
- Gómez-Gutiérrez Á, Schnabel S, De Sanjosé JJ, Contador FL (2012) Exploring the relationships between gully erosion and hydrology in rangelands of SW Spain. *Zeitschrift Geomorphol, Suppl Issues* 56:27–44. <https://doi.org/10.1127/0372-8854/2012/S-00071>
- Grabs T, Seibert J, Bishop K, Laudon H (2009) Modeling spatial patterns of saturated areas: a comparison of the topographic wetness index and a dynamic distributed model. *J Hydrol* 373:15–23. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.03.031>
- Guesri M, Megnounif A, Ghenim AN (2020) Rainfall erosivity and sediment yield in Northeast Algeria: K'sob watershed case study. *Arab J Geosci* 13:299–299. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-5276-1>
- Hadji R, Achour Y, Hamed Y (2018) Using GIS and RS for slope movement susceptibility mapping: comparing AHP, LI and Ir methods for the Oued Mellah Basin, NE Algeria. *Advances in Science, Technology and Innovation, Springer Nature*: 1853–1856
- Hasbaia M, Hedjazi A, L B R M d Sciences, undefined (2012) Variabilité de l'érosion hydrique dans le bassin du Hodna: cas du sous-bassin versant de l'oued elham. *agrimarocorg*
- He S, Wu J, Wang D, He X (2022) Predictive modeling of groundwater nitrate pollution and evaluating its main impact factors using random forest. *Chemosphere* 290:133388–133388. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133388>
- Hembram TK, Paul GC, Saha S (2019) Spatial prediction of susceptibility to gully erosion in Jainti River basin, Eastern India: a comparison of information value and logistic regression models. *Model Earth Syst Environ* 5:689–708. <https://doi.org/10.1007/s40808-018-0560-8>
- Hembram TK, Saha S, Pradhan B, Abdul Maulud KN, Alamri AM (2021) Robustness analysis of machine learning classifiers in predicting spatial gully erosion susceptibility with altered training samples. *Geomat Nat Haz Risk* 12:794–828. <https://doi.org/10.1080/19475705.2021.1890644>
- Jones S, Kasthurba AK, Bhagyanathan A, Binoy BV (2021) Landslide susceptibility investigation for Idukki district of Kerala using regression analysis and machine learning. *Arab J Geosci* 14:838–838. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-07156-6>
- Kavian A, Azmodeh A, Soleimani K, Vahabzadeh G J J o R, W Management (2010) Effect of soil properties on runoff and soil erosion in forest lands. 63:89–114
- Keesstra S, Mol G, de Leeuw J, Okx J, Molenaar C, de Cleen M, Visser S (2018) Soil-related sustainable development goals: four concepts to make land degradation neutrality and restoration work. *Land* 7:133–133. <https://doi.org/10.3390/land7040133>
- Knox JC (1972) VALLEY ALLUVIATION IN SOUTHWESTERN WISCONSIN*. *Ann Assoc Am Geogr* 62:401–410. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8306.1972.tb00872.x>
- Liu Y, Wang Y, Zhang J (2012) New machine learning algorithm: random forest. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. 7473 LNCS: 246–252
- Lugato E, Smith P, Borrelli P, Panagos P, Ballabio C, Orgiazzi A, Fernandez-Ugalde O, Montanarella L, Jones A (2018) Soil erosion is unlikely to drive a future carbon sink in Europe. *Sci Adv* 4:eaau3523. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aau3523>
- 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* 12:179–191. <https://doi.org/10.1007/s12518-019-00289-0>
- Milanović S, Marković N, Pamučar D, Gigović L, Kostić P, Milanović SD (2020) Forest fire probability mapping in eastern serbia: logistic regression versus random forest method. *Forests* 12:5–5. <https://doi.org/10.3390/f12010005>
- Minea G, Mititelu-Ionuș O, Gyasi-Agyei Y, Ciobotaru N, Rodrigo-Comino J J W R R (2022a) Impacts of grazing by small ruminants on hillslope hydrological processes: a review of European current understanding. 58:e2021WR030716
- Minea G, Ioana-Toroimac G, Neculau G, Comino JR (2022b) Designing grazing susceptibility to land degradation index (GSLDI) in hilly areas. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1329577/v1>
- Moore ID, Grayson RB, Ladson AR (1991) Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrol Process* 5:3–30. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360050103>
- Nicu I (2018) Is Overgrazing really influencing soil erosion? *Water* 10:1077–1077. <https://doi.org/10.3390/w10081077>
- Panchal S, Shrivastava AK (2022) Landslide hazard assessment using analytic hierarchy process (AHP): a case study of national highway 5 in India. *Ain Shams Eng J* 13:101626–101626. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.10.021>
- Patil RJ (2018) Spatial techniques for soil erosion estimation: remote sensing and GIS approach
- Pham QB, Achour Y, Ali SA, Parvin F, Vojtek M, Vojteková J, Al-Ansari N, Achu AL, Costache R, Khedher KM, Anh DT (2021) A comparison among fuzzy multi-criteria decision making, bivariate, multivariate and machine learning models in landslide susceptibility mapping. *Geomat Nat Haz Risk* 12:1741–1777. <https://doi.org/10.1080/19475705.2021.1944330>
- Pourghasemi HR, Yousefi S, Kornejady A, Cerdà A (2017) Performance assessment of individual and ensemble data-mining techniques for gully erosion modeling. *Sci Total Environ* 609:764–775. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.198>
- Rahaman A, Venkatesan MS, Ayyamperumal R (2021) GIS-based landslide susceptibility mapping method and Shannon entropy model: a case study on Sakaleshapur Taluk, Western Ghats, Karnataka, India. *Arab J Geosci* 14:2154–2154. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08422-3>
- Rahmati O, Tahmasebipour N, Haghizadeh A, Pourghasemi HR, Feizizadeh B (2017) Evaluation of different machine learning models for predicting and mapping the susceptibility of gully erosion. *Geomorphology* 298:118–137. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.09.006>
- Razavi-Termeh SV, Sadeghi-Niaraki A, Choi S-M (2020) Gully erosion susceptibility mapping using artificial intelligence and statistical models. *Geomat Nat Haz Risk* 11:821–844. <https://doi.org/10.1080/19475705.2020.1753824>
- Rodrigo-Comino J, Sálvia R, Egidi G, Salvati L, Giménez-Morera A, Quaranta G J C d I G (2021) Desertification and degradation risks vs poverty: a key topic in Mediterranean Europe
- Rodríguez-Galiano V, Mendes MP, García-Soldado MJ, Chica-Olmo M, Ribeiro L (2014) Predictive modeling of groundwater nitrate pollution using random forest and multisource variables related to intrinsic and specific vulnerability: a case study in an agricultural setting (Southern Spain). *Sci Total Environ* 476–477:189–206. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.01.001>
- Roy P, Chandra Pal S, Arabameri A, Chakraborty R, Pradhan B, Chowdhuri I, Lee S, Tien Bui D (2020) Novel ensemble of multivariate adaptive regression spline with spatial logistic regression and boosted regression tree for gully erosion susceptibility. *Remote Sens* 12:3284–3284. <https://doi.org/10.3390/rs12203284>
- Saha S, Gayen A, Pourghasemi HR, Tiefenbacher JP (2019) Identification of soil erosion-susceptible areas using fuzzy logic and analytical hierarchy process modeling in an agricultural watershed of Burdwan district, India. *Environ Earth Sci* 78:649–649. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8658-5>
- Selmi K, Khanchoul K (2016) Sediment load estimation in the Mellegue catchment, Algeria. *J Water Land Dev* 31:129–137. <https://doi.org/10.1515/jwld-2016-0044>

- Shano L, Raghuvanshi TK, Meten M (2021) Landslide susceptibility mapping using frequency ratio model: the case of Gamo highland, South Ethiopia. *Arab J Geosci* 14:623–623. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06995-7>
- Shruthi RBV, Kerle N, Jetten V, Stein A (2014) Object-based gully system prediction from medium resolution imagery using random forests. *Geomorphology* 216:283–294. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.04.006>
- Soleimanpour SM, Pourghasemi HR, Zare M (2021) A comparative assessment of gully erosion spatial predictive modeling using statistical and machine learning models. *CATENA* 207:105679–105679. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105679>
- Tan Z, Leung LR, Li HY, Tesfa T, Zhu Q, Huang M (2020) A substantial role of soil erosion in the land carbon sink and its future changes. *Glob Change Biol* 26:2642–2655. <https://doi.org/10.1111/gcb.14982>
- Tien Bui D, Shirzadi A, Shahabi H, Chapi K, Omidavr E, Pham BT, Talebpour Asl D, Khaledian H, Pradhan B, Panahi M, Bin Ahmad B, Rahmani H, Gróf G, Lee S (2019) A novel ensemble artificial intelligence approach for gully erosion mapping in a semi-arid watershed (Iran). *Sensors* 19:2444–2444. <https://doi.org/10.3390/s19112444>
- Ur Rehman H, Poch RM, Scarciglia F, Francis ML (2021) A carbon-sink in a sacred forest: biologically-driven calcite formation in highly weathered soils in Northern Togo (West Africa). *CATENA* 198:105027–105027. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.105027>
- Vanmaercke M, Panagos P, Vanwalleghem T, Hayas A, Foerster S, Borelli P, Rossi M, Torri D, Casali J, Borselli L, Vigiak O, Maerker M, Haregeweyn N, De Geeter S, Zglobicki W, Biolders C, Cerdà A, Conoscenti C, de Figueiredo T, Evans B, Golosov V, Ionita I, Karydas C, Kertész A, Krása J, Le Bouteiller C, Radoane M, Ristić R, Rousseva S, Stankoviansky M, Stolte J, Stolz C, Bartley R, Wilkinson S, Jarihani B, Poesen J (2021) Measuring, modelling and managing gully erosion at large scales: a state of the art. *Earth Sci Rev* 218:103637–103637. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103637>
- Wang B, Zhang Z, Wang X, Zhao X, Yi L, Hu S (2020) Object-based mapping of gullies using optical images: a case study in the black soil region, northeast of China. *Remote Sensing* 12:487–487. <https://doi.org/10.3390/rs12030487>
- Wang F, Sahana M, Pahlevanzadeh B, Chandra Pal S, Kumar Shit P, Piran MJ, Janizadeh S, Band SS, Mosavi A (2021) Applying different resampling strategies in machine learning models to predict head-cut gully erosion susceptibility. *Alex Eng J* 60:5813–5829. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.04.026>
- Wright MN, Ziegler A (2017) Ranger: A fast implementation of random forests for high dimensional data in C++ and R. *J Stat Soft* 77. <https://doi.org/10.18637/jss.v077.i01>
- Yang A, Wang C, Pang G, Long Y, Wang L, Cruse RM, Yang Q (2021) gully erosion susceptibility mapping in highly complex terrain using machine learning models. *ISPRS Int J Geo Inf* 10:680–680. <https://doi.org/10.3390/ijgi10100680>
- Yesilnacar E, Topal T (2005) Landslide susceptibility mapping: a comparison of logistic regression and neural networks methods in a medium scale study, Hendek region (Turkey). *Eng Geol* 79:251–266. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2005.02.002>
- Zeroual A, Meddi M, Bensaad S (2013) Climate and land surface changes in hydrology proceedings of H01, IAHS-IAPSO-IASPEI Assembly, Gothenburg, Sweden, July 2013 (IAHS Publ. 359, 2013) 105–110

الملخص

إن مشكل تآكل الأخاديد منتشر ومتطور بشكل متكرر في البيئات الجافة وشبه الجافة. الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو اختبار كفاءة ثلاثة نماذج فردية للتعلم الآلي لتصميم خرائط قابلية تآكل الأخاديد (GESM)، وتقييم أداء النماذج التي تم إنشاؤها والحصول عليها، واستكشاف فائدة هذه الخرائط لمساعدة صانعي القرار ومستخدمي الأراضي المحليين في تقييم تدهور الأراضي الزراعية خاصة.

إن مستجمعات مياه القصب (1570 كيلومترًا مربعًا) هي أرض زراعية وأكثر المناطق المتضررة والمتأثرة من تعرية التربة في التل الشرقي الجزائري، شمال شرق الجزائر.

لقد أدى انتشار المصاطب الغرينية والطين والمارن في المنطقة إلى تطوير أخاديد كبيرة جدًا. وأهم عواقب هذه الظاهرة الوخيمة هي ترسب الطمي في سد القصب، وفقدان الأراضي الزراعية، وعدم حماية مستجمعات المياه.

لتقييم تآكل التربة عن طريق الأخاديد في مستجمعات المياه هذه، تم تطبيق النماذج التالية: الغابة العشوائية (RF)، وتعزيز التدرج الشديد (XGBoost)، ونماذج الانحدار اللوجستي (LR). في المنطقة بأكملها، تم تحديد 565 (1475 خلية شبكية) تآكل أهدود من خلال تحقيق ميداني دقيق. تم اختيار أحد عشر عاملاً من عوامل تكييف تآكل الأهدود وتقييمها للعثور على أكثر المناطق عرضة لهذا الخطر. ثم تم تقييم أداء النماذج المطبقة الثلاث. تظهر النتائج أن نموذج XGBoost لديه أفضل أداء (AUC = 0.942)، خطأ قياسي = 0.009، و (CI = (0.893-0.971)).

يمكن أن تؤدي مطالبة مستخدمي الأراضي بتقييم تدهور الأراضي إلى زيادة وعيهم بعمليات التدهور المحلي وتحسين ملاءمة المؤشرات المحلية لتقييم التقدم المحرز في الحد من تدهور الأراضي، وخاصة الأراضي المستخدمة للزراعة.

الكلمات الرئيسية: تآكل الأخاديد · تدهور الأراضي · نظم المعلومات الجغرافية · التعلم الآلي · مستجمعات المياه في نهر القصب (الجزائر).

Résumé

L'érosion en ravines est un problème répandu et fréquemment développé dans les milieux semi-arides et arides. L'objectif principal de cette étude est de tester l'efficacité de trois modèles d'apprentissage automatique individuels pour la conception de cartes de susceptibilité à l'érosion en ravines (GESM), d'évaluer les performances des modèles générés et acquis, et d'explorer l'utilité de ces cartes pour aider les décideurs et les autorités locales.

Le bassin versant du K'sob (1 570 km²) est une terre agricole qui est la plus touchée par l'érosion des sols à Tell al-Sharqi, dans le Nord-Est de l'Algérie.

La prédominance des terrasses alluviales, argileuses et marneuses dans la zone a conduit au développement de très grandes de l'érosion en ravines. Les conséquences les plus importantes de ce phénomène désastreux sont l'envasement du barrage de K'sob, la perte de terres agricoles et le manque de protection des bassins versants.

Pour évaluer l'érosion en ravines dans ce bassin versant, les modèles suivants ont été appliqués : forêt aléatoire (RF), boosting de gradient extrême (EXBoost) et modèle de régression logistique (LR). Dans toute la région, 565 formes d'érosion (1475 réticulocytes) ont été identifiées par une plusieurs visites sur le terrain. Onze facteurs prédisposition sont été sélectionnés et évalués pour identifier les zones les plus susceptibles à cet aléa. Ensuite, les performances des trois modèles ont été évaluées. Les résultats montrent que le modèle XGBoost présente les meilleures performances (AUC = 0,942, erreur standard = 0,009 et IC « 0,893–0,971 ») comparativement aux autres.

Demander aux usagers des terres d'évaluer la dégradation des sols peut augmenter leur prise de conscience des processus de dégradation locaux et améliorer la pertinence des indicateurs locaux pour évaluer les progrès accomplis en vue de réduire la dégradation des terres, notamment celles utilisées à des fins agricoles.

Mots-clés : Erosion en ravines. Dégradation des terres. SIG. Apprentissage automatique. Bassin versant de la rivière K'sob (Algérie).

Abstract

Gully erosion is a widespread and frequently developed problem in semi-arid and arid environments. The main objective of this study is to test the effectiveness of three individual machine-learning models for the design of gully erosion susceptibility maps (GESM), to evaluate the performance of the generated and acquired models and to explore the usefulness of these maps to help decision makers and local authorities. Land users in the assessment of agricultural land degradation in particular.

The K'sob watershed (1,570 km²) is agricultural land and the area most affected by soil erosion in Tell al-Sharqi, in northeastern Algeria.

The predominance of alluvial, clay and marl terraces in the area has led to the development of very large gullies. The most important consequences of this disastrous phenomenon are the siltation of the K'sob dam, the loss of agricultural land and the lack of protection of the watersheds.

To assess soil erosion by gullies in these watersheds, the following models were applied: Random Forest (RF), Extreme Gradient Boost (EXBoost), and Logistic Regression (LR) models. Across the region, 565 gully erosions (1475 reticulocytes) were identified by careful field survey. Eleven factors conditioning gully erosion were selected and assessed to identify the areas most vulnerable to this risk. Then, the performances of the three applied models were evaluated. The results show that the XGBoost model has the best performance (AUC = 0.942, standard error = 0.009 and CI “0.893–0.971”).

Requesting land users to evaluate soil degradation can increase awareness of local degradation processes and can improve the local relevance of indicators to assess progress made in reducing land degradation, particularly for agricultural purposes.

Keywords: ravine erosion. Land degradation. GIS. Machine learning. Watershed of the K'sob River (Algeria).

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Ferhat Abbas, Sétif 1
Institut d'Architecture et des Sciences de la Terre
Département des Sciences de la Terre
Unité de Recherche en Matériaux Emergents



Thèse de Doctorat 3^{ème} cycle (LMD)

Domaine : Sciences de la terre

Filière : Géologie

Spécialité : Géologie de L'ingénieur et Géotechnique

Thème

**Etude de la susceptibilité des sols à l'érosion dans la
région de Bordj–Bou–Arreridj : Approche par SIG**

Présentée par :

DRID Ilhem

Soutenue le : 18.02.2024, devant le jury composé de :

Zahri Farid	MCA, Université Ferhat Abbas, Sétif1	Président
Achour Yacine	MCA, Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi, BBA	Directeur de Thèse
Zighmi Karim	MCA, Université Ferhat Abbas, Sétif1	Co-directeur de Thèse
Hadji Riheb	Pr, Université Ferhat Abbas, Sétif1	Examineur
Boumezbeur Abderrahmane	Pr, Université Oum El Bouaghi	Examineur
Ghrieb Lassaad	Pr, Université Guelma	Examineur

Année universitaire : 2023–2024